



รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์การทำงานของเตาไมโครเวฟหลากชนิดที่ส่งผลต่อ
อุณหภูมิที่กระจายตัวภายในอาหาร

(Operations Analysis for Various Type of Microwave Oven the Effect of
Temperature Distribution within the Food)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวอิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา

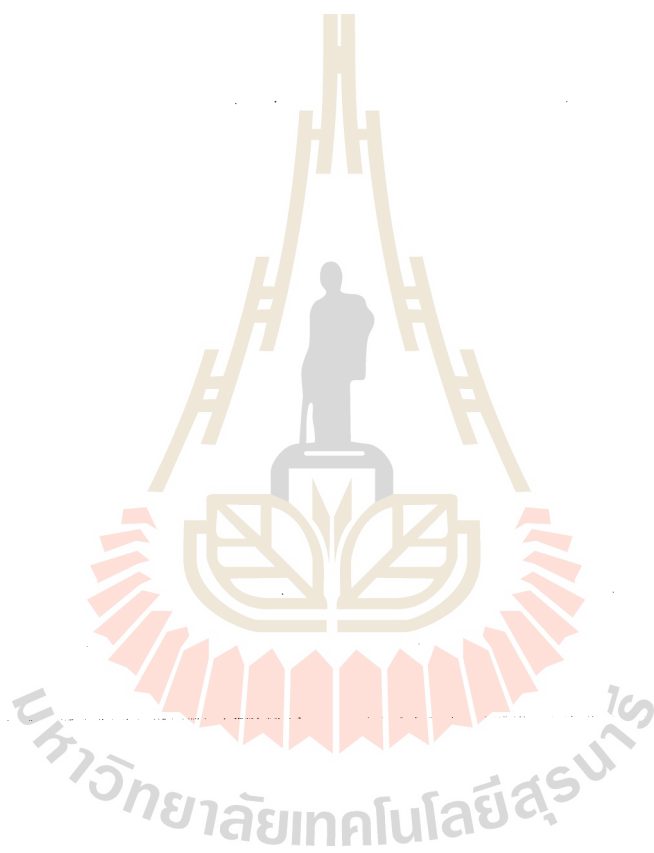
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในเตาไมโครเวฟ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาไมโครเวฟ โดยได้ใช้การประมาณค่าแบบย้อนหลังกับงานที่ขึ้นกับเวลา งานวิจัยนี้ได้นำประโยชน์ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนภายในเตาไมโครเวฟ โดยที่เตาไมโครเวฟทำงานที่ความถี่ 2,450 MHz ในเตาไมโครเวฟมีท่อนำคลื่นที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) คลื่นนี้จะถูกพัดลมพัดคลื่นให้กระจายทั่วเตา โมเลกุลของอาหารเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟจะเกิดการสั่นทำให้เกิดความร้อน โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการวิเคราะห์รูปแบบการทำงานของเตาไมโครเวฟออกเป็นแบบจานหมุนและจานไม่หมุน เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร รวมถึงการวิเคราะห์รูปแบบจำนวนของท่อนำคลื่นที่ส่งผลต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ



ABSTRACT

This research proposed mathematical model of electric field and temperature in microwave oven. The model shown in second-order partial differential equation. The simulation applied 3-D finite element method, which develops in programming of MATLAB, and can be shown the result of electric field that affect temperature in microwave oven. To solve this time-dependent system, a numerical of the backward difference algorithm is applied. This research utilizes the advantages of the 3-D finite element method for handling the heat calculation in a microwave oven which work at 2,450 MHz of frequency. In microwave oven has waveguide that called magnetron. The magnetron will be blown wave spread around in microwave oven. Molecule of foods has got the microwave will be vibrated into heat. This research will be divided the analysis of microwave condition to rotating and non-rotating for compared the distribution of temperature in food, and the analysis of number of waveguide affect to steady-state temperature.

สารบัญ

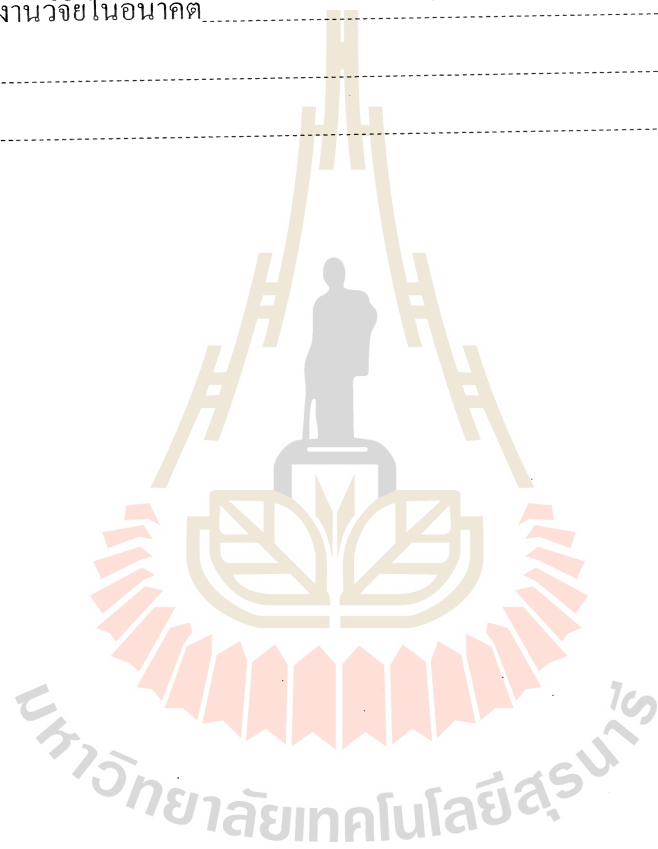
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การคำนวณสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ.....	4
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า.....	4
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิ.....	6
2.3 การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	6
2.3.1 การออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	7
2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	9
2.3.3 การสร้างสมการเอลิเมนต์.....	11
2.3.4 การประกอบสมการเอลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	15
2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย.....	16
2.4 การคำนวณอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	16
2.4.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	16
2.4.2 การสร้างสมการเอลิเมนต์.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว.....	22
2.4.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	23
2.4.5 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย.....	24
2.5 สรุป.....	24
บทที่ 3 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟ.....	25
3.1 บทนำ.....	25
3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	25
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	28
3.4 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล.....	29
3.4.1 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน.....	29
3.4.2 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน.....	30
3.5 สรุป.....	32
บทที่ 4 ผลการจำลองอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้า.....	33
4.1 บทนำ.....	33
4.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	33
4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล.....	37
4.4 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในอาหารด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล.....	38
4.4.1 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน.....	38
4.4.2 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน.....	47
4.4.3 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน.....	54
4.4.4 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน.....	60
4.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมุน และไม่หมุน.....	65

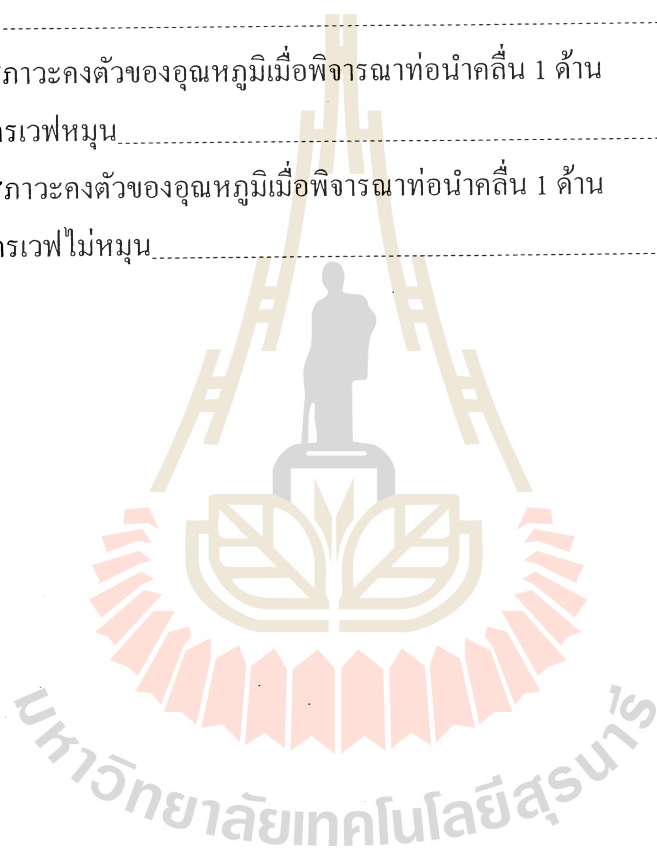
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณา จำนวนของท่อนำคลื่นที่แตกต่างกัน.....	68
4.7 สรุป.....	71
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุป.....	72
5.2 ข้อเสนอและแผนงานวิจัยในอนาคต.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ประวัติผู้วิจัย.....	77



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผล.....	28
4.1 พารามิเตอร์ของอนุหภูมิที่ใช้ในการจำลองผล.....	37
4.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุหภูมิเมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมนและไม่หมน กรณีท่อนำคลื่น 1 ด้าน.....	65
4.3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุหภูมิเมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมนและไม่หมน กรณีท่อนำคลื่น 3 ด้าน.....	67
4.4 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอนุหภูมิเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟหมน.....	68
4.5 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอนุหภูมิเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟไม่หมน.....	70



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของเตาไมโครเวฟแบบ 3 มิติ.....	9
3.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า.....	26
3.2 ค่ามิติต่าง ๆ ของเตาไมโครเวฟ.....	28
3.3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (V/m) ในอาหารเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน.....	29
3.4 ค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน.....	30
3.5 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (V/m) ในอาหารเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน.....	31
3.6 ค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน.....	31
4.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ.....	34
4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอาหารเมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟ แบบมีที่หน้าคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน ณ เวลาใด ๆ.....	45
4.3 ค่าอุณหภูมิ (°C) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน.....	46
4.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอาหารเมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟ แบบมีที่หน้าคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน ณ เวลาใด ๆ.....	52
4.5 ค่าอุณหภูมิ (°C) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน.....	53
4.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอาหารเมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟ แบบมีที่หน้าคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน ณ เวลาใด ๆ.....	58
4.7 ค่าอุณหภูมิ (°C) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน.....	59
4.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอาหารเมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟ แบบมีที่หน้าคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน ณ เวลาใด ๆ.....	64
4.9 ค่าอุณหภูมิ (°C) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน.....	64
4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีหน้าคลื่น 1 ด้าน.....	66
4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีหน้าคลื่น 3 ด้าน.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟหมุน.....	69
4.13 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟไม่หมุน.....	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันเตาไมโครเวฟเป็นที่นิยมและแพร่หลายเป็นอย่างมาก เพราะมีประโยชน์ด้านการให้ความสะดวกสบายและความรวดเร็วในการประกอบอาหาร ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในอาหาร มีปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น จำนวนที่นำคลื่น รูปร่างของอาหาร หรือแม้แต่การหมุนและไม่หมุนของจานไมโครเวฟก็มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งสิ้น โดยที่เตาไมโครเวฟจะมีที่นำคลื่นที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) คลื่นนี้จะถูกพัลคมพัคคลื่นให้กระจายไปทั่วเตา โมเลกุลของอาหารเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ จะเกิดการสั่นทำให้เกิดความร้อน โดยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่พิจารณาเกี่ยวกับคุณลักษณะต่าง ๆ ของเตาไมโครเวฟ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิของเตาไมโครเวฟในรูปแบบการทำงานของเตาไมโครเวฟแบบต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3-D FEM) ในการดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและ

รวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจาก โหนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) เพื่อประมาณ โดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการดำเนินการ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ มาใช้ในการคำนวณเพราะสามารถกำหนดรูปร่างและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเตาไมโครเวฟได้อย่างครบถ้วน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟ ให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง
- 2) พัฒนาโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เป็นผลจากสนามไฟฟ้าที่ปรากฏในเตาไมโครเวฟ ให้สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง
- 3) เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร เมื่อพิจารณารูปแบบการทำงานของเตาไมโครเวฟเป็นแบบจานหมุนและจานไม่หมุน
- 4) ศึกษาและวิเคราะห์จำนวนของท่อนำคลื่นที่ส่งผลต่อความร้อนภายในอาหารและการเข้าสู่สถานะคงตัวของอุณหภูมิ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) กำหนดให้ไมโครเวฟมีความถี่ 2,450 MHz ตลอดทุกการทำงาน
- 2) กำหนดให้เตาไมโครเวฟไม่มีการแผ่สนามไฟฟ้าสู่ภายนอก
- 3) กำหนดให้รูปทรงอาหารมีความสมคูล

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรม FEM สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ
- 2) วิธี FEM ที่ใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเป็นแบบ 3 มิติ

3) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าระหว่างจานไมโครเวฟหมุนและจานไมโครเวฟไม่หมุน

4) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลอง โดยการเพิ่มจำนวนของท่อนำคลื่นที่ส่งผลต่อความร้อนภายในอาหาร และการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1) ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ

2) ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ ตลอดจนสามารถนำไปใช้เพื่อประกอบการเรียนการสอนด้านสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ

3) ได้ทราบถึงรูปแบบการทำงานของเตาไมโครเวฟในแต่ละลักษณะที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาหาร

1.6 การจัดรูปแบบรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟและขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่กระจายตัวในอาหาร

บทที่ 3 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้า พร้อมผลการจำลองสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

บทที่ 4 อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิ พร้อมผลการจำลองอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

การคำนวณสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ

ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

2.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อยที่สามารถหาผลเฉลยของปัญหาที่ซับซ้อนและจำลองรูปแบบ ลักษณะได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถนำไปคำนวณปัญหาด้านอื่น ต่อเนื่องกันได้อีกด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและ อุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อ ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่กระจายตัวในเตาไมโครเวฟ

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า

สมการหนึ่งในชุดสมการของแมกซ์เวลล์ในรูปแบบอนุพันธ์ที่สนามมีการแปรค่าตามเวลา แสดงค่าได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

และจากกฎของแอมแปร์ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

สมการแมกซ์เวลล์เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่มีการแปรค่าตามเวลา แต่คุณสมบัติที่มีความสำคัญยิ่งกว่าการที่สนามทั้งสองมีความสัมพันธ์กันก็ คือ สนามที่แปรค่าตามเวลาสามารถแพร่กระจายไปในตัวกลางได้ โดยตั้งต้นด้วยการพิจารณา ความสัมพันธ์ของ \mathbf{E} และ \mathbf{H} ซึ่งจากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะสังเกตเห็นว่า \mathbf{E} และ \mathbf{H} ไม่ได้ แยกอิสระออกจากกัน ทำให้โดยทั่วไปแล้วไม่สามารถแก้สมการได้ จึงได้หาหนทางที่จะอธิบาย

พฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสมการที่ง่ายกว่านี้ วิธีที่จะทำให้สมการนี้ง่ายขึ้นก็คือการพยายามแยก \mathbf{E} และ \mathbf{H} ให้อิสระออกจากกัน ซึ่งดำเนินการได้โดยการเคิร์ลสมการหนึ่งทั้งสองด้าน แล้วนำอีกสมการหนึ่งมาแทน ซึ่งตั้งต้นได้โดย

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.3)$$

ดำเนินการเคิร์ลทั้งสองข้างของสมการ จึงได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (2.4)$$

แทน $\nabla \times \mathbf{H}$ จากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้สมการที่ (2.5)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

โดยมีเอกลักษณ์ของเวกเตอร์ต่อการดำเนินการอนุพันธ์อันดับสองในกรณีที่ทำค่าเคิร์ลของเคิร์ล คือ $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ โดยที่ $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\varepsilon}$ (มาจาก $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$) ดังนั้นจึงได้

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \rho_v \quad (2.6)$$

เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่ไม่นำไฟฟ้า (nonconducting media) ซึ่ง $\sigma = 0$ (อย่างเช่นอวกาศว่าง) และตัวกลางนั้นไม่มีต้นกำเนิดหรือแหล่งจ่าย (sourceless) ซึ่ง $\rho_v = 0$ ภายใต้งื่อนไขเหล่านี้จะได้ $\mathbf{J} = 0$ ดังนั้นจึงได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2.7)

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิ

การถ่ายเทความร้อนนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในแบบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

โดยที่	T	คือ	อุณหภูมิ (Temperature)
	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)
	c	คือ	ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นมวล (Mass density)
	Q	คือ	อัตราปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (Internal heat generation)

โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ซึ่งปัญหาการถ่ายเทความร้อนนี้เป็นแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วครู่ (Linear transient heat transfer problem) เป็นปัญหาอีกรูปแบบหนึ่งโดยอุณหภูมิที่จุดต่อจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.3 การคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การคำนวณสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟมีความซับซ้อนเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟ และประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้านี้ (สุกัญญา ทัพศรี, 2555) ซึ่งจาก

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

โดยที่	μ	คือ	สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability)
	ϵ	คือ	สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity)
	\mathbf{E}	คือ	สนามไฟฟ้า (Electric field)

โดยที่ $\mu = \mu_0 \mu_r$ และ $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์และ ε_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

และจากคุณสมบัติของระบบที่สามารถแปลงรูปแบบจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ (Time-harmonic) อย่างเช่นในงานวิจัยเตาไมโครเวฟนี้ จึงได้

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \approx j\omega \mathbf{E} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = -\omega^2 \mathbf{E} \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (2.12)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุม

ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) จึงได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟสำหรับปัญหาแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังสมการที่ (2.13)

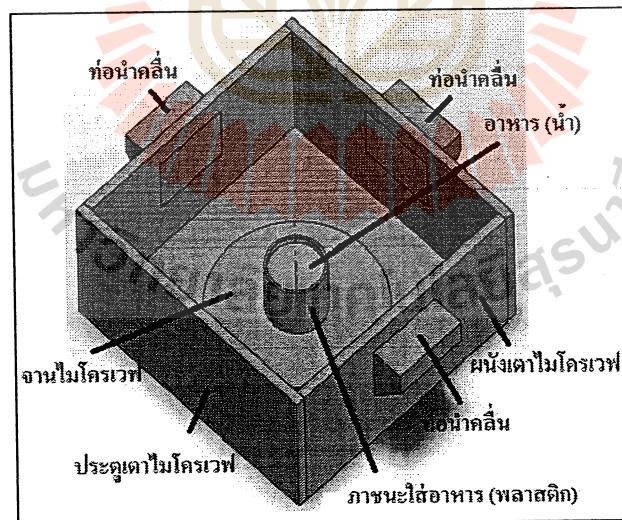
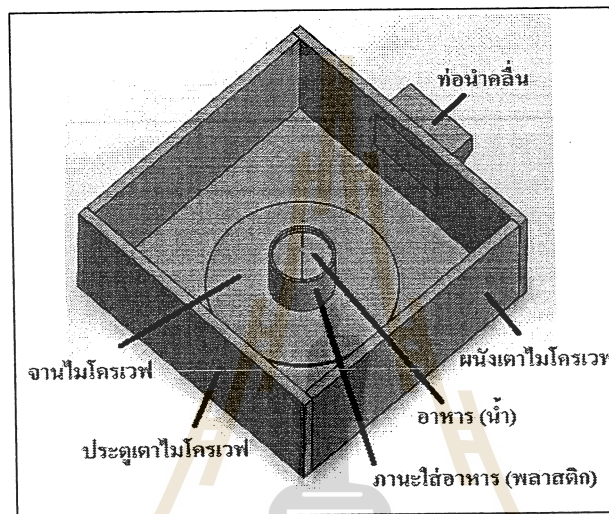
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) + \varepsilon \omega^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2.13)$$

2.3.1 การออกแบบอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

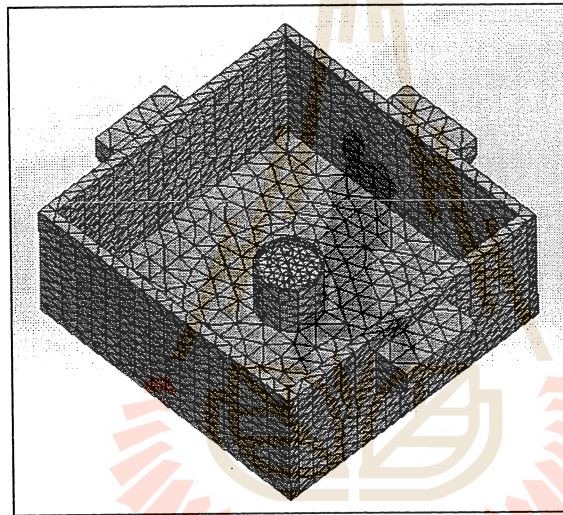
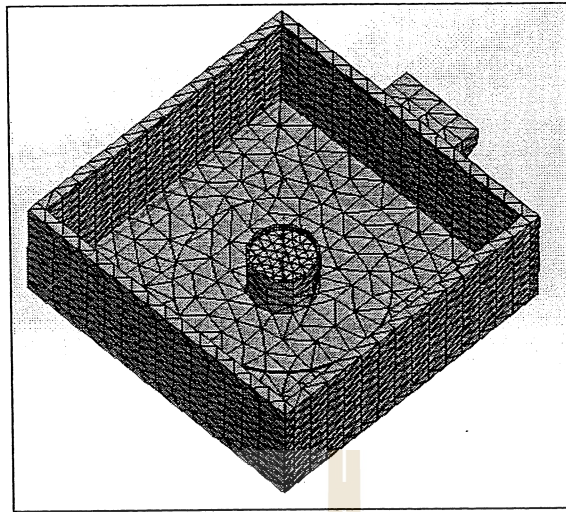
หลักการของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลิเมนต์ โดยที่การกระจัดและแรงภายในแต่ละอิลิเมนต์ ณ จุดที่อิลิเมนต์ต่อโงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาปัญหาแบบ 3 มิติ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนดหรือจุดเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้าสามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น (ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2542)

เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นซึ่งงานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ย่อย โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works ซึ่งได้ผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

ในการออกแบบพื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟด้วยการใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จะครอบคลุมทั่วทั้งหมดของเตาไมโครเวฟ ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.1 ซึ่งจากรูปเป็นการแบ่งอิลิเมนต์ด้วยรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedron) ตลอดปริมาตรเตาไมโครเวฟที่ศึกษาด้วยโปรแกรมการสร้างกริดของ Solidworks โดยที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 4,325 จุดต่อ และจำนวนอิลิเมนต์ 22,387 อิลิเมนต์ ส่วนท่อนำคลื่น 3 ด้าน จะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 6,044 จุดต่อ และจำนวนอิลิเมนต์ 31,533 อิลิเมนต์



ก) ส่วนประกอบภายในเตาไมโครเวฟของท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน



ข) การแบ่งอิลิเมนต์ของท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน

รูปที่ 2.1 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของเตาไมโครเวฟแบบ 3 มิติ

2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ขั้นตอนนี้เป็น การเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในกรณีของสนามไฟฟ้าจากเตาไมโครเวฟจะได้

$$E(x, y, z) = E_1 N_1 + E_2 N_2 + E_3 N_3 + E_4 N_4 \quad (2.14)$$

โดยที่ N_n คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ และ E_n คือผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อ 1 2 3 และ 4 ของอิลิเมนต์ ซึ่งในกรณีอิลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะได้อะไร

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (2.15)$$

V คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่เหลี่ยมของอิลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

2.3.3 การสร้างสมการของอีลิเมนต์

การสร้างสมการอีลิเมนต์ (element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ตั้งสมการที่ (2.13) ซึ่งขั้นตอนนี้อถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ อย่างไรก็ตามอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า รูปแบบทั่วไปของสมการของอีลิเมนต์สำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงได้ดังสมการ (Huebner, Dewhurst, Smith, and Byrom, 2001)

$$[K + M]\{E\} = 0 \quad (2.17)$$

ประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Residual) ซึ่งในปัจจุบันถือว่าเป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกออกไปได้อีก เช่น วิธีของกาเลอร์กิน (Galerkin) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้ คือ การแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (2.13) จะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ หากแต่จะมีค่าเท่ากับ R แทน ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.18)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial z} \right) + \varepsilon \omega^2 E = R \quad (2.18)$$

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (Weight Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุดเพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่ตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาเลอร์กิน (Preston et al., 1988; Kim et al., 1999) ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function : W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอีลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad (2.19)$$

สำหรับอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า จุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุด ซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (2.19) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่า บับ โนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทนค่า R ด้วยสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.19) จะได้สมการที่ (2.20)

$$\int_V N_n \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) \right) + (\epsilon \omega^2 \mathbf{E}) \right] dv = 0 \quad (2.20)$$

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) \right) dv + \int_V N_n (\epsilon \omega^2 \mathbf{E}) dv = 0 \quad (2.21)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (2.21) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V u(\nabla \cdot \mathbf{V}) dv = \int_{\Gamma} u(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) d\Gamma - \int_V (\nabla u \cdot \mathbf{V}) dv \quad (2.22)$$

Γ คือ ขอบเขตของอีลิเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับพจน์แรกของสมการที่ (2.21) จะได้

$$u = N_n$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \mathbf{k}$$

และเนื่องจาก \mathbf{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอีลิเมนต์ Γ

$$\mathbf{n} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} n_z$$

$$u(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) = N_n \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} n_z \right)$$

$$\nabla u = \frac{\partial N_n}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\nabla u \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.21) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} n_z \right) d\Gamma - \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) dv + \int_V N_n (\varepsilon \omega^2 \mathbf{E}) dv = 0 \quad (2.23)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (2.23) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอีลิเมนต์ โดยทำการประยุกต์เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) เมื่อ กำหนดให้ $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ ดังนั้นจึงได้สมการไฟไนต์อีลิเมนต์แสดงดังนี้

$$\int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) dv - \int_V N_n (\varepsilon \omega^2 \mathbf{E}) dv = 0 \quad (2.24)$$

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} \right) dv - \int_V [N_n]_{4 \times 1} (\varepsilon \omega^2 \mathbf{E}) dv = 0 \quad (2.25)$$

และจากสมการที่ (2.14) จึงได้ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า \mathbf{E} โดยประมาณแต่ละอีลิเมนต์เป็น

$$\mathbf{E}(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [\mathbf{E}]_{4 \times 1}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [\mathbf{E}]_{4 \times 1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [\mathbf{E}]_{4 \times 1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [\mathbf{E}]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์อิลิเมนต์ซึ่งกลายมาเป็น

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dv [\mathbf{E}]_{4 \times 1} - \epsilon \omega^2 \int_V [N]_{4 \times 1} dv [\mathbf{E}] = 0 \quad (2.26)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการดังนี้

$$[M]_{4 \times 4} \{\mathbf{E}\}_{4 \times 1} + [K]_{4 \times 4} \{\mathbf{E}\}_{4 \times 1} = 0 \quad (2.27)$$

เมทริกซ์ $[K]_{4 \times 4}$

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dv \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{b_n}{6V} \quad \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.29)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{\mu} \int \left(\frac{b_n b_m}{6V 6V} + \frac{c_n c_m}{6V 6V} + \frac{d_n d_m}{6V 6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.30)$$

$$= \frac{1}{36\mu V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz$$

$$= \frac{1}{36\mu V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix}$$

Sym

เมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$

$$\text{จาก } [M]_{4 \times 4} = (-\varepsilon \omega^2) [N]_n [N]_m \, dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.31)$$

สมการที่ (2.31) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (Factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรรูปทรงสี่หน้าดังสมการที่ (2.32)

$$\int_V N_1^a N_2^b N_3^c N_4^d \, dv = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) สามารถพิจารณาแยกเป็น 2 กรณี คือ $N_n = N_m$ และ $N_n \neq N_m$

ในกรณีที่ $N_n = N_m$ การพิจารณาจุดต่อที่ i ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a = 2, b = 0, c = 0, d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.32)

$$\int_V N_1^2 \, dv = \frac{2!0!0!0!}{(2+0+0+0+3)!} 6V = \frac{2V}{20} \quad (2.33)$$

ในกรณีที่ $N_n \neq N_m$ การพิจารณาจุดต่อที่ i ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a = 1, b = 1, c = 0, d = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.32)

$$\int_V N_1^1 N_2^1 \, dv = \frac{1!1!0!0!}{(1+1+0+0+3)!} 6V = \frac{V}{20} \quad (2.34)$$

ที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็ได้รับการพิจารณาในลักษณะนี้เช่นกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.31) จึงได้เมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.35) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเลิเมนต์

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{-\omega^2 \varepsilon V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

2.3.4 การประกอบสมการอิเลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำสมการของแต่ละอิเลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.3.1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิเลิเมนต์ย่อย

ซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อจึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$[K + M]_{n \times n} \{E\}_{n \times 1} = 0 \quad (2.36)$$

2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบ (constraints) โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ผิวผนังด้านนอกของเตาไมโครเวฟมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 0 และสนามไฟฟ้าที่ท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 2×10^5 V/m โดยค่าสนามไฟฟ้าที่ท่อนำคลื่นนั้นมาจากโหมดของท่อนำคลื่น TE₁₀ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.37) (Geedipalli, Rakesh, and Datta, 2007)

$$E_0 = 9.1 \times 10^3 \sqrt{P_{2.45\text{GHz}}} \quad \text{V/m} \quad (2.37)$$

โดยที่ $P_{2.45\text{GHz}} = 500 \text{ W}$

$$\begin{aligned} E_0 &= 9.1 \times 10^3 \sqrt{500} \\ &= 2 \times 10^5 \end{aligned} \quad \text{V/m}$$

2.4 การคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ในการคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในการคำนวณอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟแบบ 3 มิติ จะแสดงได้ในสมการที่ (2.8) ที่ผ่านมา

2.4.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

จากการออกแบบเอลิเมนต์ในหัวข้อ 2.3.1 ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้ว รูปแบบของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะใช้รูปแบบเหมือนกับเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทุกประการ เพราะฉะนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ละการออกแบบเอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษาไป ซึ่งการเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ของการคำนวณอุณหภูมิแบบ 3 มิติ จะดำเนินการเช่นเดียวกับการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ผ่านมา

กรณีทีพิจารณากระบบเป็นแบบ 3 มิติ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอติเมนท์ที่เป็นแบบเชิงเส้นจะได้

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (2.38)$$

โดยที่ N_i , $i=1,2,3,4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอติเมนท์ และ T_i , $i=1,2,3,4$ คือผลลัพธ์ของอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ (1,2,3,4) ของอติเมนท์ ซึ่ง

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (2.39)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอติเมนท์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.40)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$\begin{aligned}
 d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\
 d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\
 d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\
 d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)
 \end{aligned}$$

2.4.2 การสร้างสมการของอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาความร้อนแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราวแบบ 3 มิติ มีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยดังแสดงด้วยสมการที่ (2.8) ที่แสดงก่อนหน้าดังนี้

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

จากสมการจัดรูปให้ด้านขวาของสมการเท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการที่ (2.41) สำหรับปัญหาความร้อนใน 3 มิติที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นี้จะใช้ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค้ำด้วยวิธีกัลเลอร์กินเช่นเดียวกันกับปัญหาสนามไฟฟ้าที่ผ่านมาดังแสดงด้วยสมการที่ (2.42)

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q = 0 \quad (2.41)$$

$$\int_{\Omega} W_n R d\Omega = 0 \quad n=1,2,3,4 \quad (2.42)$$

โดยเมื่อพิจารณาปัญหาความร้อน จะได้เศษตค้ำ R ดังสมการที่ (2.39)

$$R = k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q \quad (2.43)$$

สำหรับอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า จุดที่ไม่รู้ค่ามี 4 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่รู้ค่า นั่นหมายถึงในสมการที่ (2.42) จะต้องมีค่า $n = 1,2,3,4$ และโดยปกติจะเลือก $W_n = N_n$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า R ด้วยสมการ (2.43) ลงในสมการที่ (2.42) จะได้

$$\int_V N_n \left(k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q \right) dV = 0 \quad (2.44)$$

แล้วแตกพจน์ต่าง ๆ ออกมาเพื่อทำการพิจารณา จะได้

$$\int_V N_n \left(k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV - \int_V N_n \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV + \int_V N_n (Q) dV = 0 \quad (2.45)$$

พจน์แรกของสมการที่ (2.45) แทนการแพร่กระจายความร้อน พจน์ที่สองแทนอัตราความจุความร้อน และพจน์ที่สามแทนปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นได้เองภายในอีลิเมนต์ ตามลำดับ สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.45) เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ จึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{\Gamma} N_n \left(k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma - \int_V \left(k \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV - \int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V N_n Q dV = 0 \quad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.46) จัดรูปใหม่จะได้สมการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับอีลิเมนต์ที่ได้ดังนี้

$$\int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} N_n (hT) d\Gamma = \int_V N_n Q dV + \int_{\Gamma} N_n (h(T_{\infty})) d\Gamma \quad (2.47)$$

และเนื่องจากสมการที่ (2.47) มีทั้งหมด 4 สมการ เราสามารถเขียนสมการไฟไนต์อีลิเมนต์ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.48) ดังนี้

$$\int_V [N]_{4 \times 1} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial x} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial y} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{\Gamma} N_n (hT) d\Gamma = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (h(T_{\infty})) d\Gamma \quad (2.48)$$

และจากสมการที่ (2.48) จึงได้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ T โดยประมาณในแต่ละอีลิเมนต์เป็น

$$T(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\partial T}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [T]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์อิลิเมนต์จึงกลายมาเป็น

$$\int_V [N]_{4 \times 1} \rho c [N]_{1 \times 4} dV \left[\dot{T} \right]_{4 \times 1} + \int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [T]_{4 \times 1} + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma [T]_{4 \times 1} = \int_V [N]_{4 \times 1} Q dV + \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} (h(T_{\infty})) d\Gamma \quad (2.49)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการได้ดังนี้

$$[C]_{4 \times 4} \left\{ \dot{T} \right\}_{4 \times 1} + \left[[K_c] + [K_h] \right]_{4 \times 4} \{ T \}_{4 \times 1} = \{ Q_h \}_{4 \times 1} + \{ Q_Q \}_{4 \times 1} \quad (2.50)$$

เมทริกซ์ของการจุความร้อน: $[C]_{4 \times 4}$

$$[C]_{4 \times 4} = \int_V ([N]_{4 \times 1} \rho c [N]_{1 \times 4}) dV \quad (2.51)$$

จากสมการที่ (2.38) และหากความหนาแน่นมวล ρ และความร้อนจำเพาะ C มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2.51) จึงกลายเป็น

$$[C]_{4 \times 4} = \rho c \int N_n N_m dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.52)$$

สมการที่ (2.52) นี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรเหมือนดังหัวข้อที่ผ่านมาจะได้

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

เมทริกซ์ของการแพร่กระจายความร้อน: $[K_c]_{4 \times 4}$

$$\text{จาก} \quad [K_c]_{4 \times 4} = \int_V \left(k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + k \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (2.54)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในดั่งสมการที่ (2.38) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.55)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.54) ลงในสมการที่ (2.53) จะได้

$$[K_c]_{4 \times 4} = k \int \left(\frac{b_n b_m}{6V 6V} + \frac{c_n c_m}{6V 6V} + \frac{d_n d_m}{6V 6V} \right) dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.56)$$

$$= \frac{k}{36V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int dx dy dz$$

$$= \frac{k}{36V} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \quad n, m = 1, 2, 3, 4$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Sym

เมทริกซ์ของการพาความร้อน: $[K_h]_{4 \times 4}$

$$[K_h]_{4 \times 4} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h [N]_{1 \times 4} d\Gamma \quad (2.58)$$

จากสมการที่ (2.58) และหากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาการถ่ายเท ความร้อนบนปริมาตรของอิลิเมนต์ที่จึงกลายเป็น

$$[K_h]_{4 \times 4} = h \int N_n N_m dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.59) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรจะได้

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

โพลีเวกเตอร์การพาความร้อน: $\{Q_h\}_{4 \times 1}$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \int_{\Gamma} [N]_{4 \times 1} h T_{\infty} d\Gamma \quad (2.61)$$

หรือเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอิเลิเมนต์ที่ดั่งนั้นสมการที่ (2.61) จึงกลายเป็น

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = h T_{\infty} \int N_n dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.62)$$

สมการที่ (2.62) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{h T_{\infty} V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

โพลีเวกเตอร์ของปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง: $\{Q_Q\}_{4 \times 1}$

$$\{Q_Q\}_{4 \times 1} = \int_{\Omega} [N]_{4 \times 1} Q d\Omega \quad (2.64)$$

หรือ

$$\{Q_Q\}_{4 \times 1} = Q \int N_n dx dy dz \quad n, m = 1, 2, 3, 4 \quad (2.65)$$

สมการที่ (2.65) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_Q\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

2.4.3 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราวจะใช้วิธีความสัมพัทธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (2.67) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (Time step) โดยถ้าเลือกใช้ $\beta = 0$ จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า $\beta = 1/2$ เป็นวิธีของแครงค์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า $\beta = 2/3$ เป็นวิธีของกาลเลอร์กิน (Galerkin) และถ้า $\beta = 1$ จะเรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (Backward difference) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังดัง

สมการที่ (2.68) เนื่องจากวิธีนี้ประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (2.67)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (2.68)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง สมการที่ (2.50) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (2.69) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (2.68) ลงในสมการที่ (2.69) จึงได้ผลลัพธ์ของสมการไฟไนท์อิลิเมนต์เมื่อพิจารณาปัญหาในสถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (2.70)

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [K] \{T\}^{t+\Delta t} = \{Q\}^{t+\Delta t} \quad (2.69)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + [K] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^t + \{Q\}^{t+\Delta t} \quad (2.70)$$

โดยที่ $[K] = [K_c] + [K_h]$

และ $\{Q\} = \{Q_h\} + \{Q_o\}$

2.4.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.3.1 ในระบบ 3 มิติ หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาปัญหาแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราว คือ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} + [K]_{n \times n} \right) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (2.71)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$([C]_{n \times n} + \Delta t [K]_{n \times n}) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \Delta t \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (2.72)$$

เมื่อ

$$[M]_{n \times n} = [C]_{n \times n} + \Delta t [K]_{n \times n}$$

$$[F]_{n \times 1} = [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \Delta t \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t}$$

ดังนั้นจึงได้สมการรวมของงานวิจัยนี้ คือ

$$[M]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = [F]_{n \times 1} \quad (2.73)$$

2.4.5 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาผลเฉลย

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยของอุณหภูมิ T เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้แก่ระบบเตาไมโครเวฟ และเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในรอบแรกที่พิจารณาระบบเตาไมโครเวฟ คือ $T(t=0) = 30^\circ\text{C}$

ส่วนค่าโพลดเวกเตอร์ของปริมาณความร้อนจะใช้ค่าปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้นเองของทั้งพื้นที่หรือปริมาตรที่พิจารณา โดยค่าปริมาณความร้อนจะหาได้จากความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$Q = \sigma E^2$$

เมื่อ σ คือ ค่าสภาพนำทางไฟฟ้า

E คือ ค่าสนามไฟฟ้า

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ เมื่อพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การประยุกต์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์คิน รายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้จะนำไปสู่การประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 และบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟ

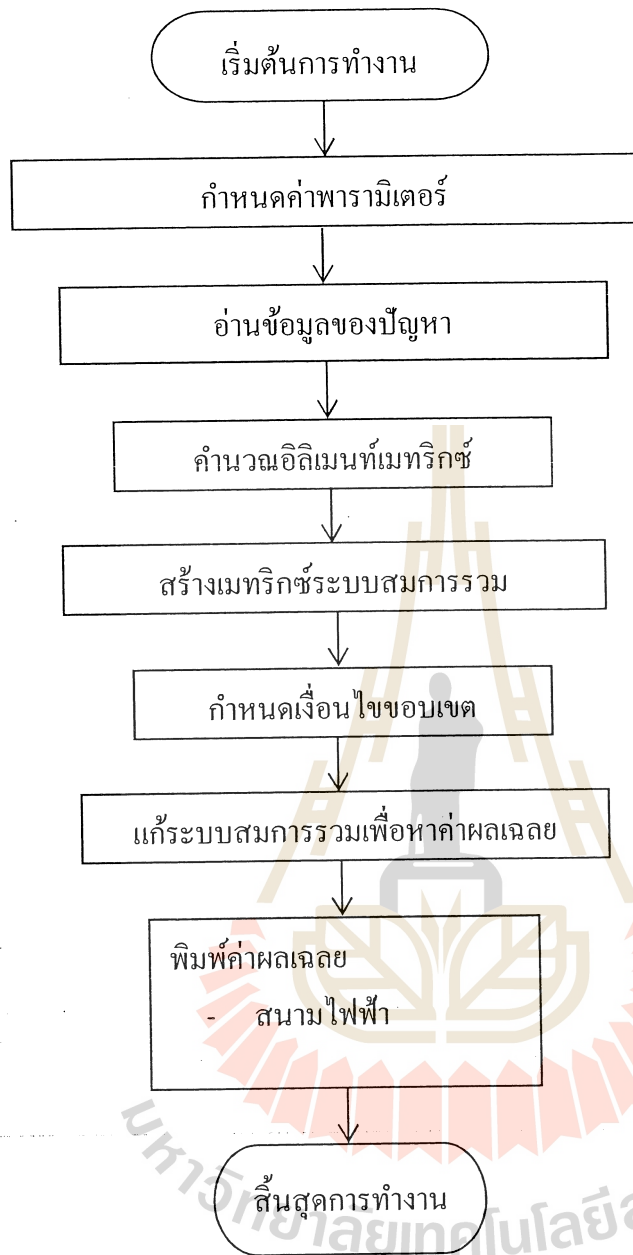
3.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟ ซึ่งค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้นั้นจะมีผลมาจากค่าสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาไมโครเวฟ ในบทที่ 3 นี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรมได้ถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB

3.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟ เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและอิลิเมนต์เกิดจากโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Work

การคำนวณสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟก่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไปไม่มีความคล่องตัวเพียงพอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้า

จากแผนภูมิในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวม เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุต่าง ๆ ในเตาไมโครเวฟ

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหา: จากนั้นโปรแกรมจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิเลิเมนต์และจุดต่อจากเอาต์พุตไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Work ที่ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิเลิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์: ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณอิเลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อของทุก ๆ อิเลิเมนต์ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.27) จากบทที่ที่ผ่านมา หรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (3.1) โดยที่ $\{E\}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการ

$$[M]_{4 \times 4} \{E\}_{4 \times 1} + [K]_{4 \times 4} \{E\}_{4 \times 1} = 0 \quad (3.1)$$

โดยที่

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{-\omega^2 \varepsilon V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ \text{Sym} & b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม: โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิเลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.27) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (3.4) โดยมีหลักการคือหาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิเลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้อง ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิเลิเมนต์ย่อย n จุดต่อจึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$[K + M] \{E\} = 0 \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต: โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม โดยมีหลักการคือตัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (3.4) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตให้ผิวผนัง

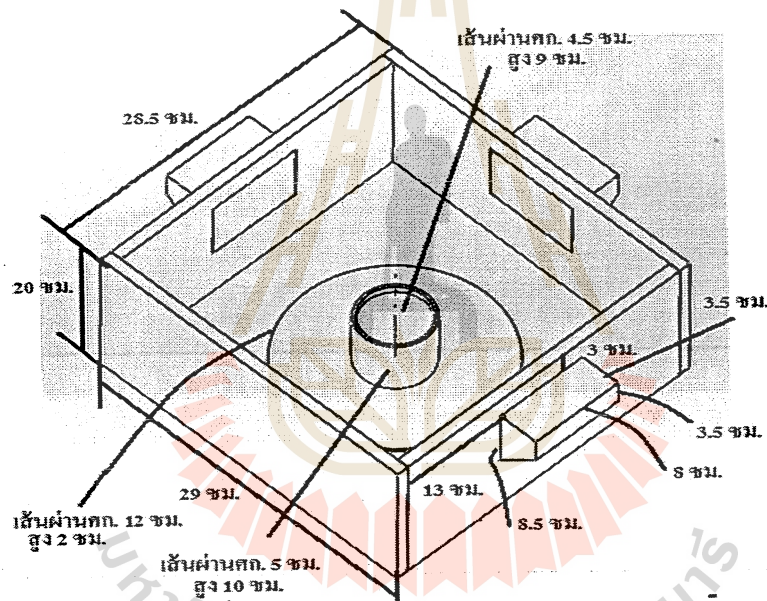
ด้านนอกของเตาไมโครเวฟมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 0 และสนามไฟฟ้าที่ท่อนำคลื่นมีค่าเท่ากับ 2×10^5 V/m ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าที่ท่อนำคลื่นนั้นมาจากสมการที่ (2.37)

ขั้นตอนที่ 6 แก่ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้ปัญหามหาสมการเชิงเส้น เพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย : จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดของเตาไมโครเวฟ

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

ค่ามิติต่าง ๆ ของเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ค่ามิติต่าง ๆ ของเตาไมโครเวฟ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองผล

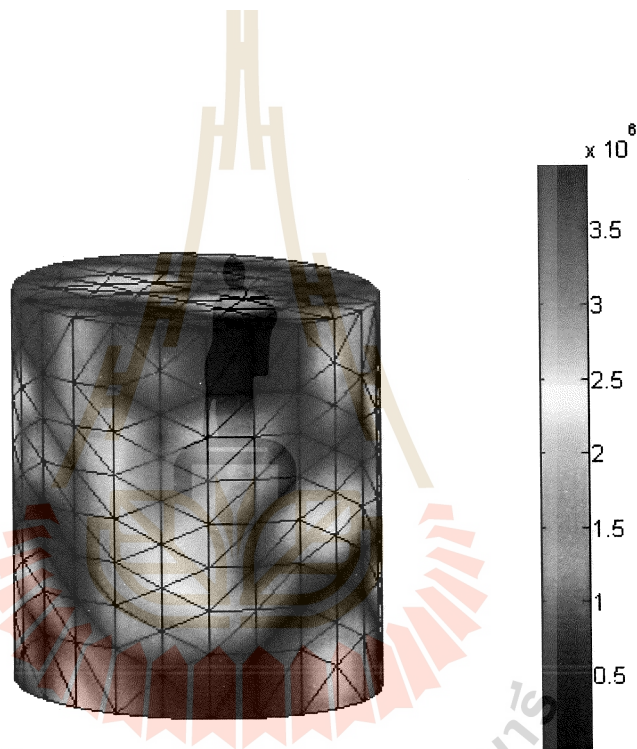
วัสดุที่ใช้	μ_r	ϵ_r
อาหาร(น้ำ)	0.9999994	88
ท่อนำคลื่น	0.9999906	3.4
ถาดไมโครเวฟ	4.87×10^{-15}	4.7
ผนังเตาไมโครเวฟ	1.000021	3.4
ภาชนะใส่อาหาร (พลาสติก)	3.33	2.25
อากาศ	1.00000037	1

3.4 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล

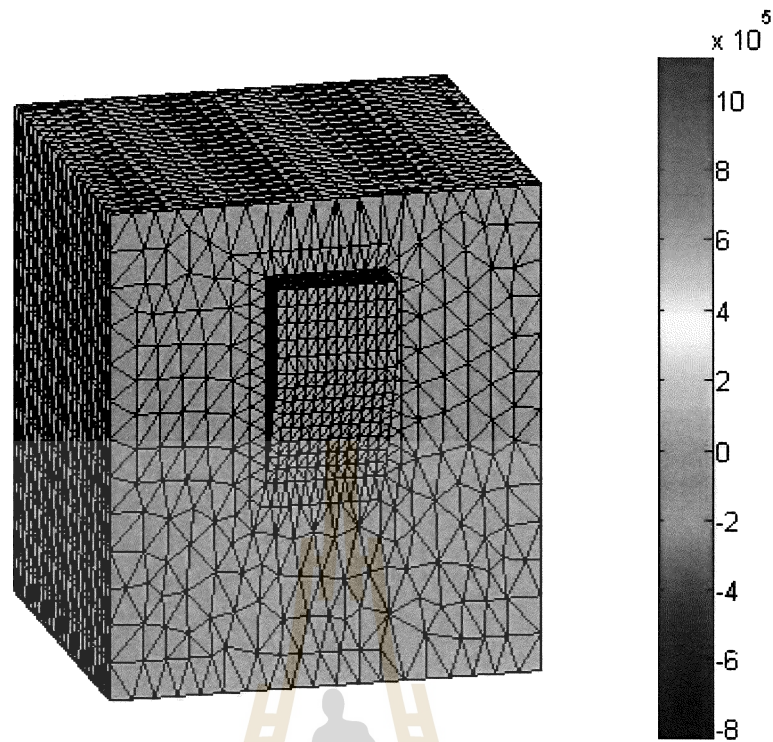
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะทำการจำลองเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน และมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

3.4.1 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน

ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารเมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (V/m) ในอาหารเมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน

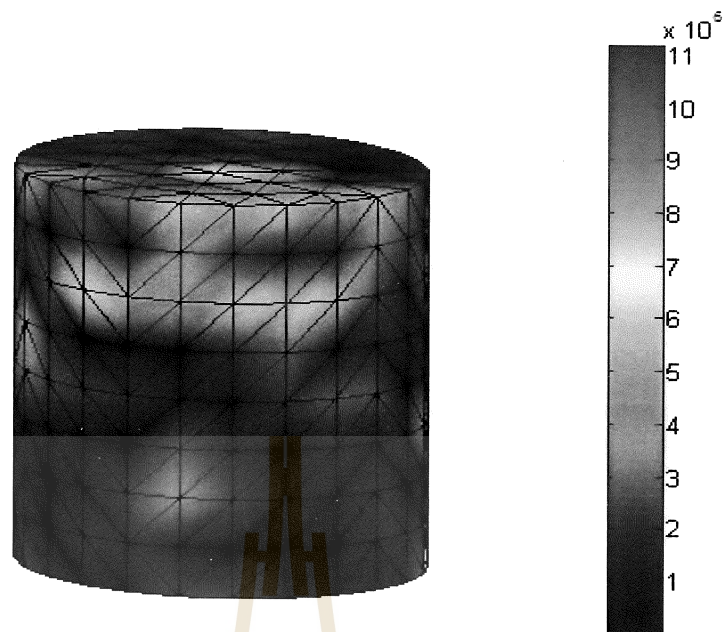


รูปที่ 3.4 ค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน

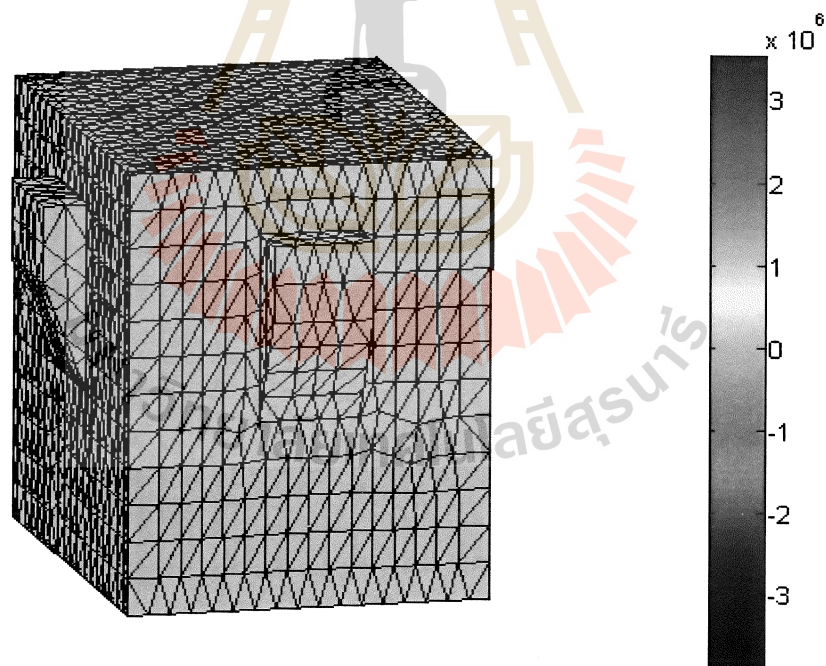
จากผลเฉลยการจำลองค่าสนามไฟฟ้าของโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.3-3.4 นั้น จะสังเกตเห็นว่า ค่าของสนามไฟฟ้าในอาหารกรณีที่มีหน้าคลื่น 1 ด้านจะกระจายทั่วอาหาร และจะสังเกตเห็นว่าที่ผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านนอกจะมีค่าสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

3.4.2 ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารแบบมีหน้าคลื่น 3 ด้าน

ผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในอาหารเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (V/m) ในอาหารเมื่อพิจารณาที่อนาคติน 3 ด้าน



รูปที่ 3.6 ค่าสนามไฟฟ้า (V/m) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่อนาคติน 3 ด้าน

จากผลเฉลยการจำลองค่าสนามไฟฟ้าของโปรแกรมไฟไนท์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.5-3.6 นั้น จะสังเกตเห็นว่า ค่าของสนามไฟฟ้าภายในอาหารกรณีที่มีท่อนำคลื่น 3 ด้านจะกระจายทั่วอาหาร ซึ่งผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านนอกจะมีค่าสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าสนามไฟฟ้าภายในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน มีค่ามากกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน เนื่องจากแหล่งกำเนิดค่าสนามไฟฟ้ามีจำนวนเพิ่มขึ้นตามจำนวนของท่อนำคลื่นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตจากค่าขนาดของสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.5

3.4 สรุป

บทที่ 3 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการจำลองของค่าสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมจำลองผลสนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3.1 จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าค่าสนามไฟฟ้าภายในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน มีค่ามากกว่าค่าสนามไฟฟ้าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน เนื่องจากจำนวนของท่อนำคลื่นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดมีค่าเพิ่มขึ้น



บทที่ 4

ผลการจำลองอุณหภูมิของเตาไมโครเวฟที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้า

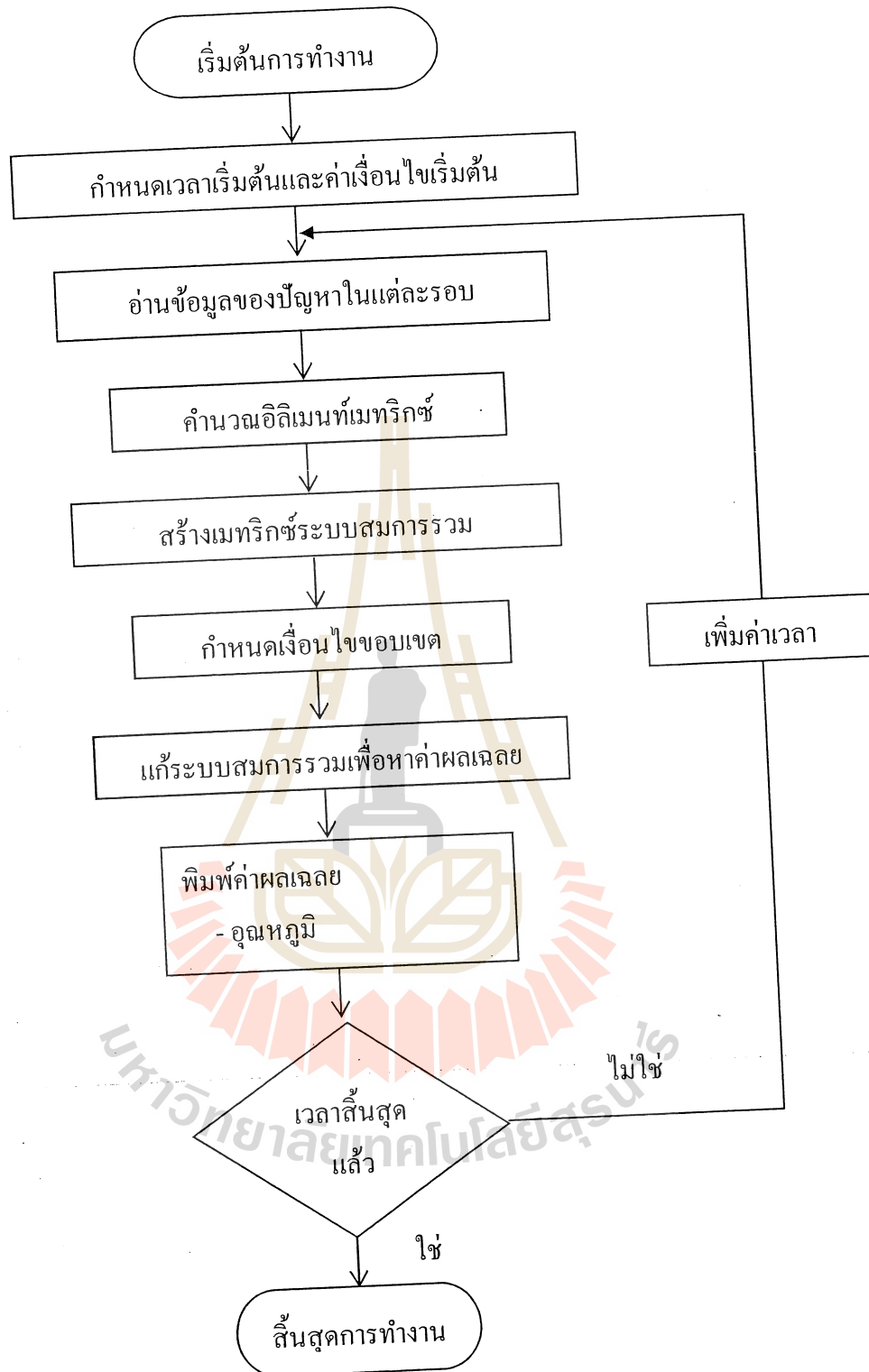
4.1 บทนำ

ในบทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมผลการจำลองค่าสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิภายในเตาไมโครเวฟ ดังนั้นสำหรับบทที่ 4 นี้ เป็นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าอุณหภูมิ โดยมีแหล่งกำเนิดความร้อน (Heat source) ในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation : PDE) ของปัญหาความร้อนนั้นมีผลมาจากค่าสนามไฟฟ้า สำหรับการคำนวณอุณหภูมิในบทนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ปัญหาในสถานะชั่วคราว ซึ่งขั้นตอนและวิธีการจะมีความคล้ายคลึงกันกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้คำนวณสนามไฟฟ้าในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานของ MATLAB เช่นเดียวกัน

4.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB โดยกริดที่สร้างขึ้นเพื่อกำกับคุณลักษณะของจุดต่อและเอลิเมนต์ที่ป้อนให้แก่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดจากการสร้างกริดโดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid Work

การคำนวณอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟเมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างคำนวณได้ยาก แต่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงสามารถคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประดิษฐ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ สำหรับโครงสร้างของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิสามารถแทนได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณอุณหภูมิ

จากแผนภูมิในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวม เพื่อให้
เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละส่วน จึงได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ เป็น
ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดเวลาเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขเริ่มต้น: โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วย
การกำหนดค่าเวลาเริ่มต้น $t=0$ สำหรับการคำนวณในรอบแรกซึ่งจำนวนรอบหรือเวลาสิ้นสุดของ
การคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนหรือเวลาที่ใช้ในการหมุนไปที่มุมต่าง ๆ ของถาดไมโครเวฟและ
อาหาร โดยเมื่อถาดไมโครเวฟและอาหารหมุนไปลักษณะของอิลิเมนต์และจุดต่อจะแปรเปลี่ยนตาม
มุมที่ หมุน ไปด้วย โดยงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 30°C
 $T(t=0)=30^{\circ}\text{C}$ ส่วนการหมุนรอบถัดไปจะใช้ค่าตอบจากรอบที่ผ่านมา เพื่อให้การเข้าสู่หา
คำตอบที่ถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ: จากนั้น โปรแกรมจะรับค่าข้อมูล
อินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของอิลิเมนต์และจุดต่อจากเอาต์พุต ไฟล์ที่เกิดจากการสร้างกริดของ
โปรแกรมสำเร็จรูป Solid Work ที่ซึ่งรายละเอียดในไฟล์ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของจุด
ต่อหมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณอิลิเมนต์เมทริกซ์: ขั้นตอนนี้ โปรแกรมจะใช้การคำนวณ
อิลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสของทุก ๆ อิลิเมนต์ที่แสดงด้วยสมการที่ (2.71) จากบทที่
ผ่านมาหรือนำมาแสดงใหม่ในบทนี้ดังสมการที่ (4.1) โดยที่ $\{T\}_{4 \times 1}$ คือเวกเตอร์คำตอบของสมการที่
ทำการคำนวณในแต่ละรอบ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C]_{4 \times 4} + [K]_{4 \times 4} \right) \{T\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1}^t + \{Q\}_{4 \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4.1)$$

สมการที่ (4.1) นี้จะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์ของการจุความร้อน
 $[C]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.53) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.2) อิลิเมนต์เมทริกซ์ของ
การแพร่กระจายความร้อน $[K_c]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.57) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่
(4.3) เมทริกซ์ของการพาความร้อน $[K_h]_{4 \times 4}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.60) หรือนำมาแสดงใหม่ดัง
สมการที่ (4.4) โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน $\{Q_h\}_{4 \times 1}$ ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.63) หรือนำมา
แสดงใหม่ดังสมการที่ (4.5) และโหลดเวกเตอร์ของปริมาณความร้อนที่ผลิตเอง $\{Q_e\}_{4 \times 1}$ ดังแสดง
ด้วยสมการที่ (2.66) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.6) เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละ
อิลิเมนต์เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวม

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Sym

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\{Q_h\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\{Q_e\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม: โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลิเมนต์เมทริกซ์ย่อย ๆ เข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงด้วยสมการที่ (2.71) หรือนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (4.7) โดยมีหลักการคือหาหมายเลขจุดต่อที่แท้จริงของอิลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่แล้วใส่ค่าสัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์เมทริกซ์นั้นลงในเมทริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมให้ถูกต้องซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย n จุดต่อ จึงก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งสิ้น n สมการ

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} + [K]_{n \times n} \right) \{T\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C]_{n \times n} \{T\}_{n \times 1}^t + \{Q\}_{n \times 1}^{t+\Delta t} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต: โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการแก้ระบบสมการรวมโดยมีหลักการคือตัดแปลงระบบสมการรวมตามสมการที่ (4.7) ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไขขอบเขต โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

โดยที่ ค่าอุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังไมโครเวฟ เท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิค่าสุดท้าย T_{∞} เท่ากับ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

ขั้นตอนที่ 6 แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย: โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 7 พิมพ์ค่าผลเฉลย: จากนั้นโปรแกรมจะพิมพ์ค่าผลเฉลยออกมาเป็นค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดของเตาไมโครเวฟ

ขั้นตอนที่ 8 เวลาสิ้นสุดแล้ว: ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะพิจารณาถึงการคำนวณค่าในรอบถัดไป ถ้าหากเวลาที่กำหนดในการคำนวณยังไม่สิ้นสุด โปรแกรมก็จะย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 อ่านข้อมูลของปัญหาในแต่ละรอบ และกระทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ดังเดิม แต่ถ้าหากสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้ โปรแกรมก็จะหยุดการคำนวณเป็นอันจบการทำงานของโปรแกรม

4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล

ค่าพารามิเตอร์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองผล

วัสดุที่ใช้	k (W/K·m ²)	c (KJ/kg·k)	ρ (kg/m ³)	h (kJ/kg)
อาหาร(น้ำ)	0.6	4.187	1000	50
ท่อนำคลื่น	401	0.381	8960	0
ถาดไมโครเวฟ	1.05	0.6	2600	0
ผนังเตาไมโครเวฟ	205	0.896	2700	0
ภาชนะใส่อาหาร (พลาสติก)	3.03	0.5	1175	0
อากาศ	0.024	1.10	1.2	0

4.4 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในอาหารด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาไมโครเวฟ พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่แปรตามเวลาที่เกิดขึ้นในอาหาร โดยจะทำการจำลองลักษณะของเตาไมโครเวฟดังนี้

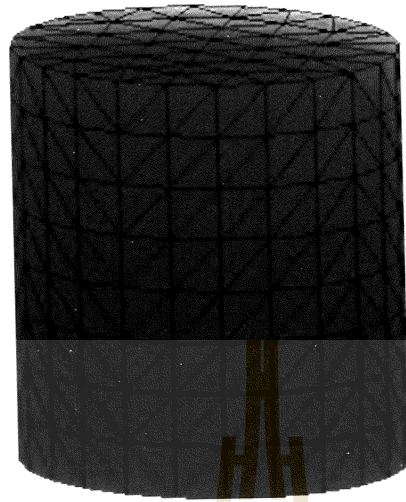
- เตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน
- เตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน
- เตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน
- เตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน

4.4.1 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน

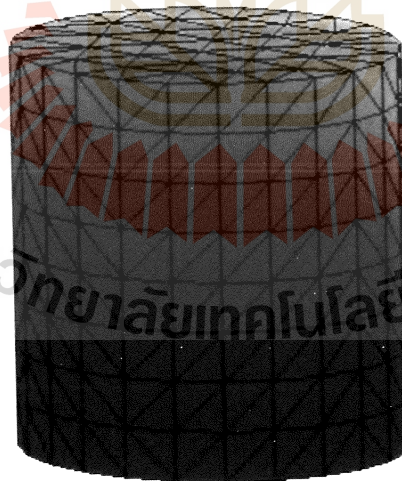
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารเมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และค่าอุณหภูมิที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



ก) ที่เวลา 0 วินาที

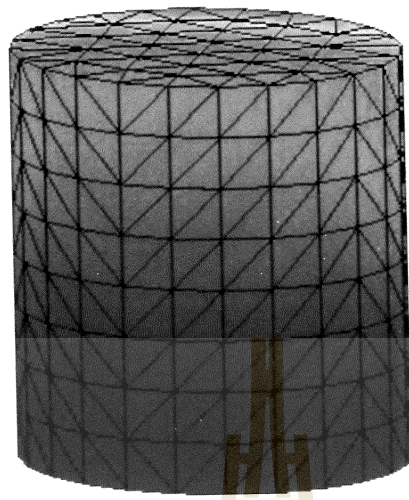


ข) ที่เวลา 10 วินาที

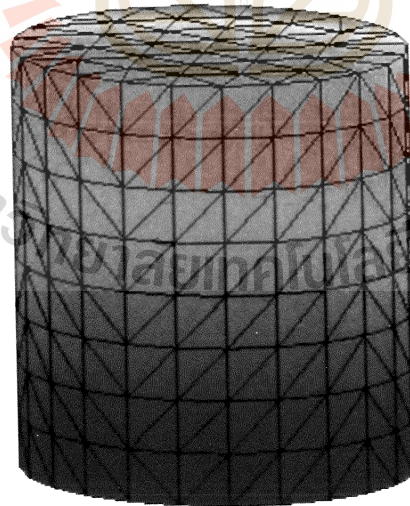


ค) ที่เวลา 20 วินาที

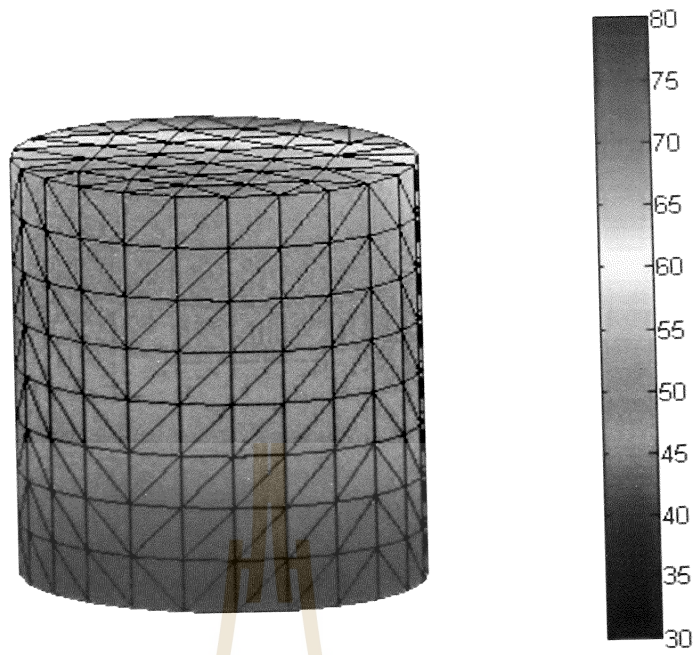
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



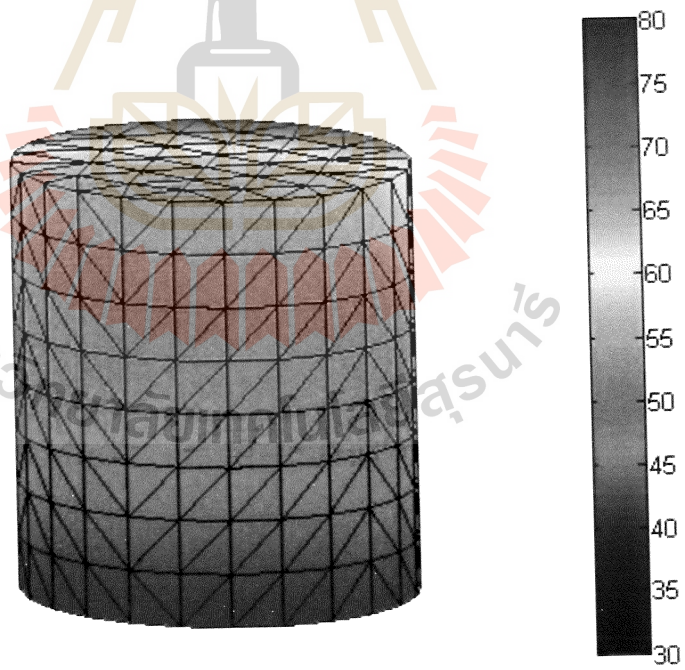
ง) ที่เวลา 30 วินาที



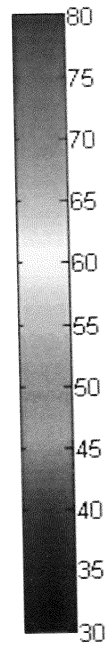
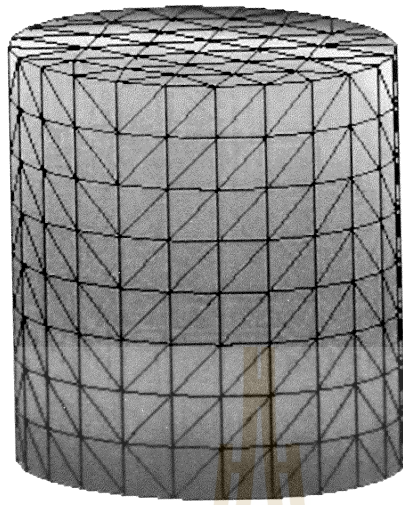
จ) ที่เวลา 40 วินาที



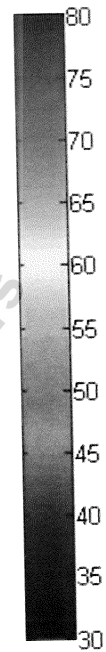
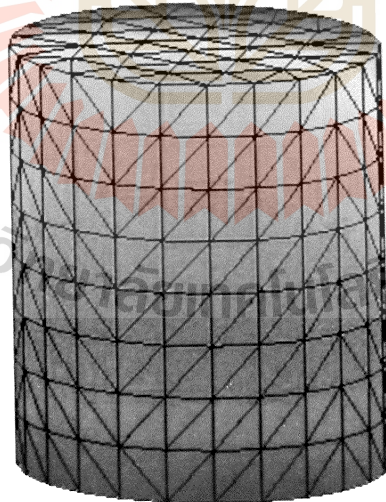
จ) ที่เวลา 50 วินาที



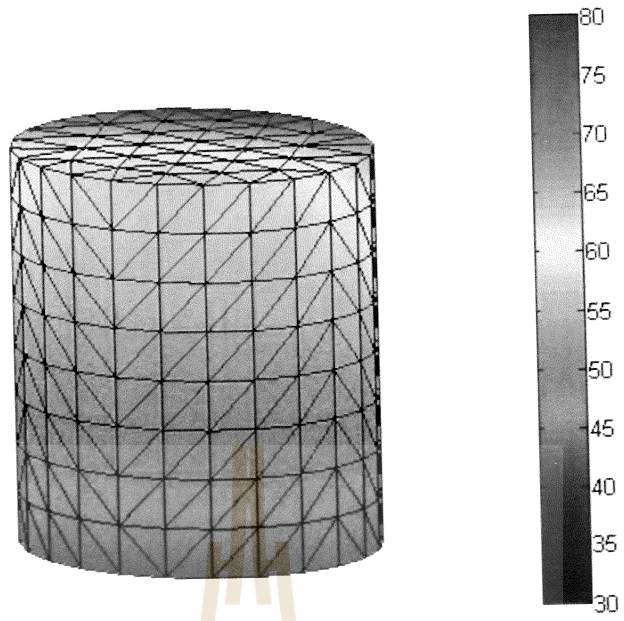
ข) ที่เวลา 60 วินาที



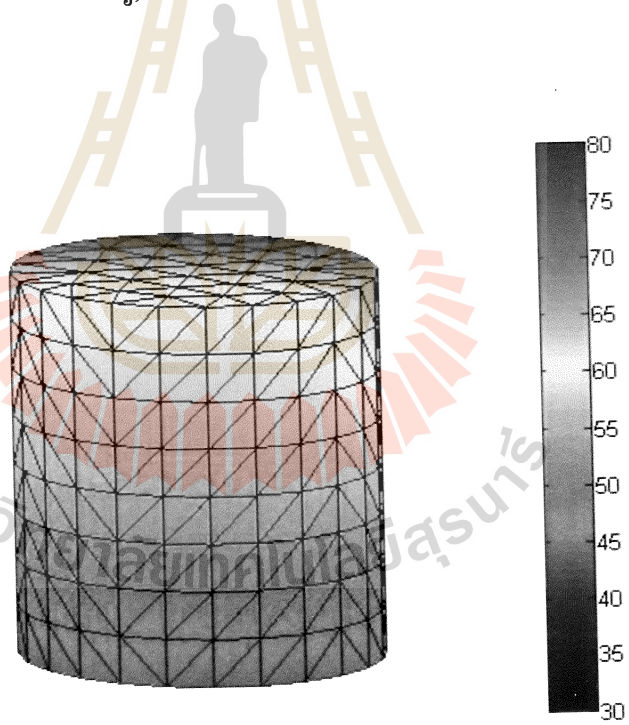
ซ) ที่เวลา 70 วินาที



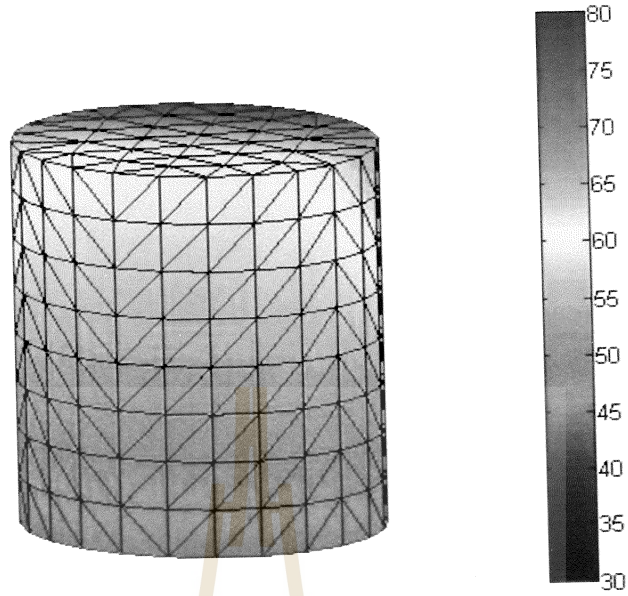
ฅ) ที่เวลา 80 วินาที



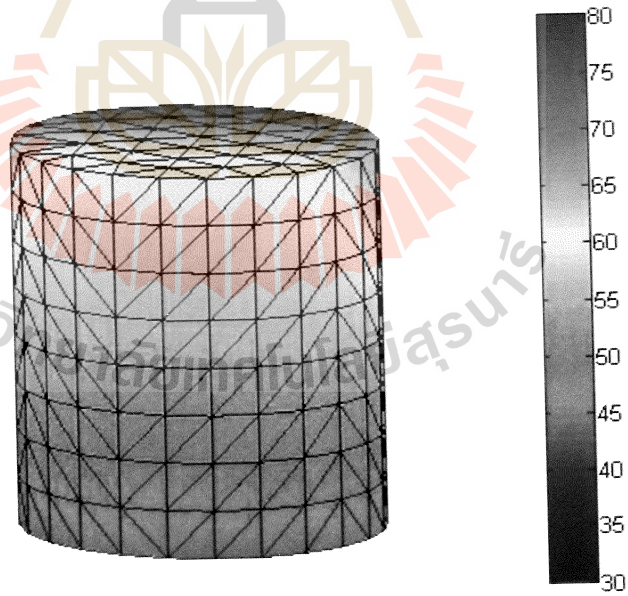
ญ) ที่เวลา 90 วินาที



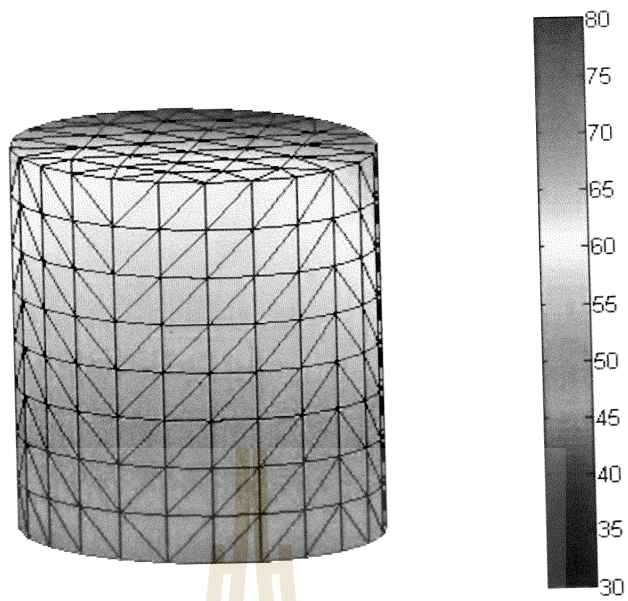
ฉ) ที่เวลา 100 วินาที



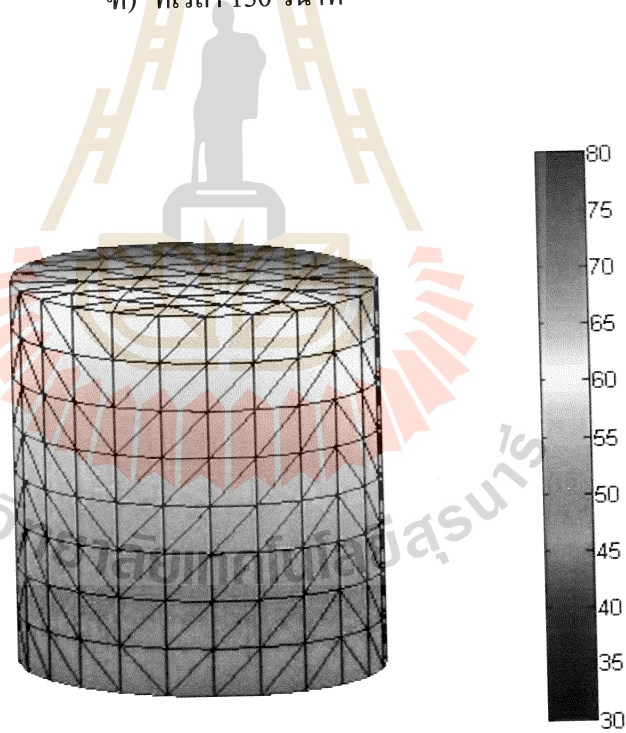
ฎ) ที่เวลา 110 วินาที



ฐ) ที่เวลา 120 วินาที

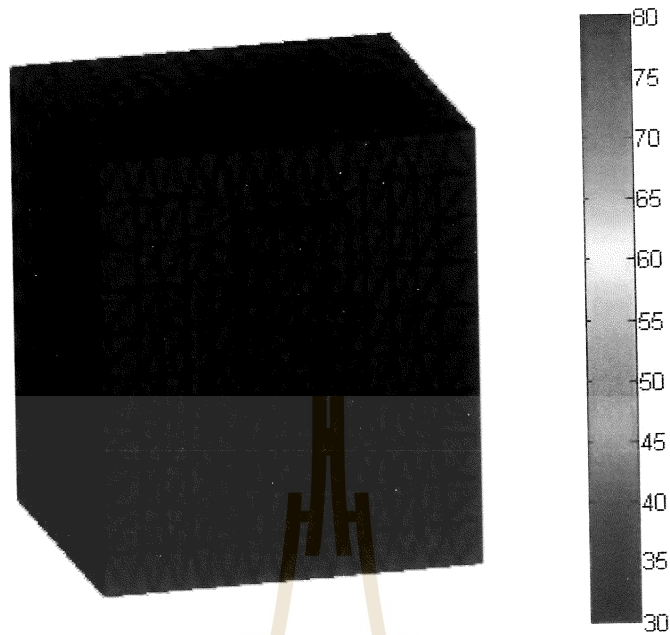


๓) ที่เวลา 130 วินาที



๔) ที่เวลา 140 วินาที

รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ในอาหารเมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน ณ เวลาใด ๆ

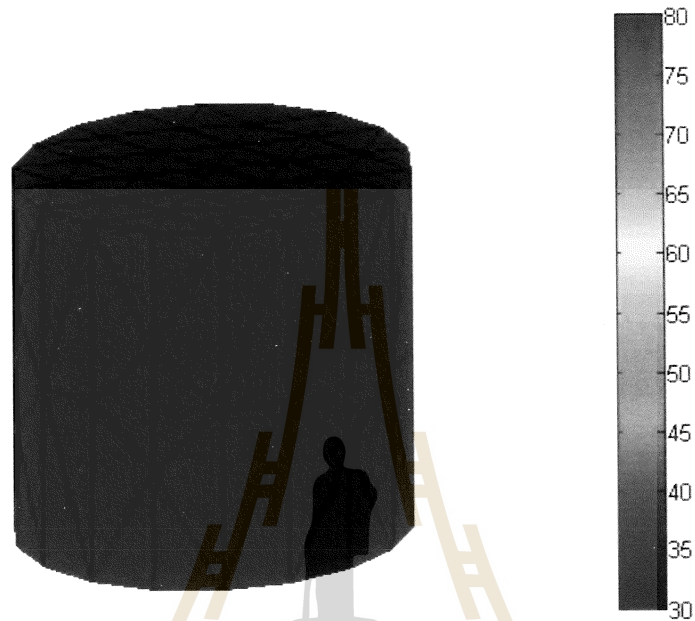


รูปที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน

จากผลเฉลยการจำลองค่าอุณหภูมิของโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณด้านหลังของอาหารจะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณด้านหลังติดกับที่หน้าคลื่นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และผลของค่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิของอาหารอยู่ในสถานะคงตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในกรณีนี้จะเข้าสู่สถานะคงตัว ณ เวลา 99.663 วินาที โดยจากรูปที่ 4.2 ก) จะมีค่าของอุณหภูมิในอาหารเท่ากับ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มแรกจากการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุก ๆ โหนดค่าคำตอบ และจากรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าที่ผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านบนจะมีค่าอุณหภูมิมิค่าเป็น 30°C เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.4.2 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีที่อุ่นถื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมูน

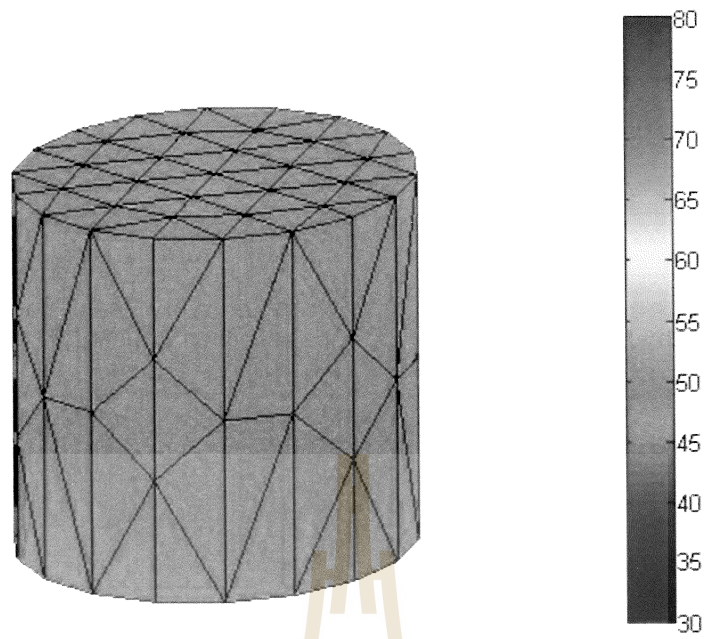
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารเมื่อพิจารณาที่อุ่นถื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมูน แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และค่าอุณหภูมิที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่อุ่นถื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมูน แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



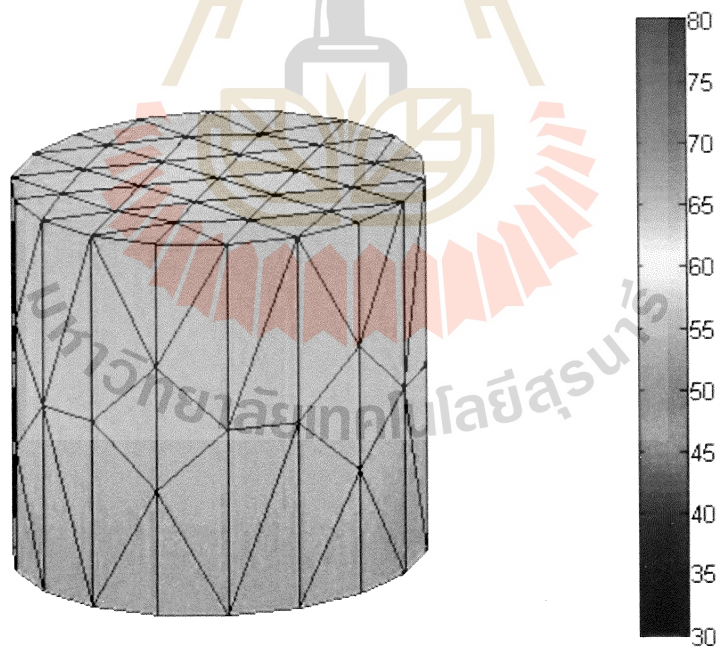
ก) ที่เวลา 0 วินาที



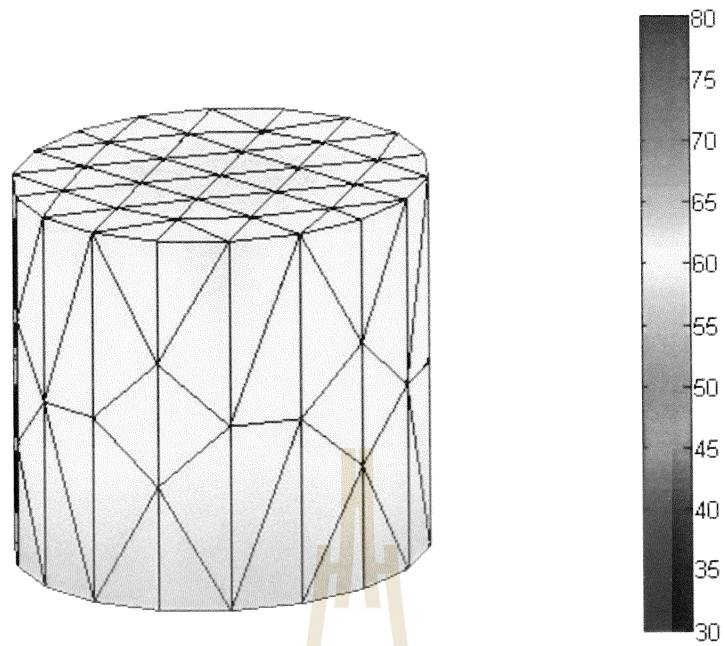
ข) ที่เวลา 10 วินาที



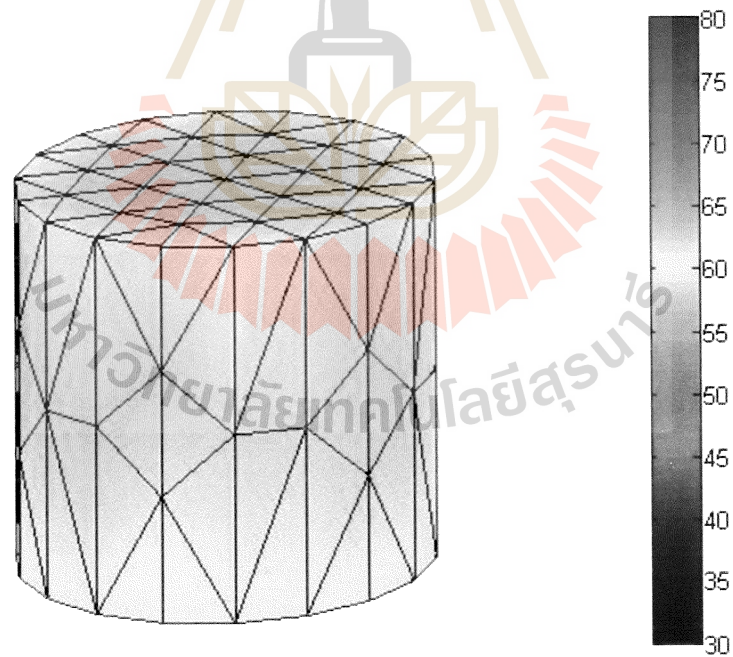
ค) ที่เวลา 20 วินาที



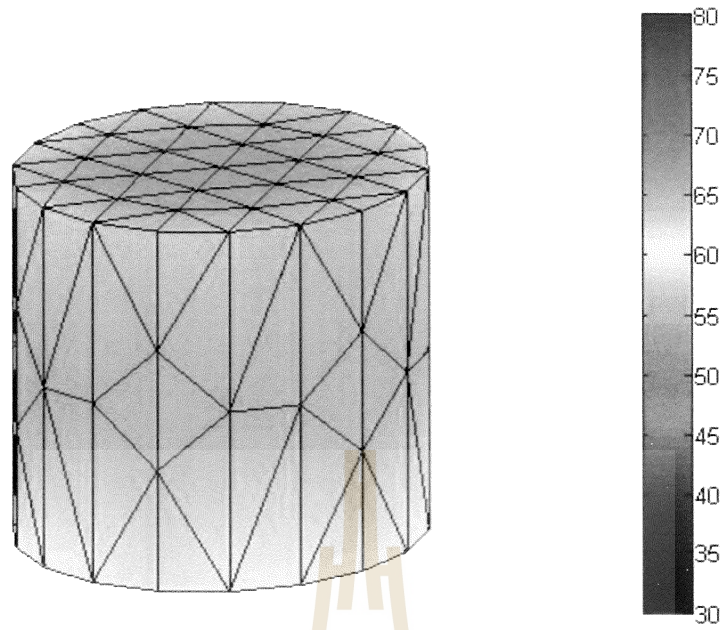
ง) ที่เวลา 30 วินาที



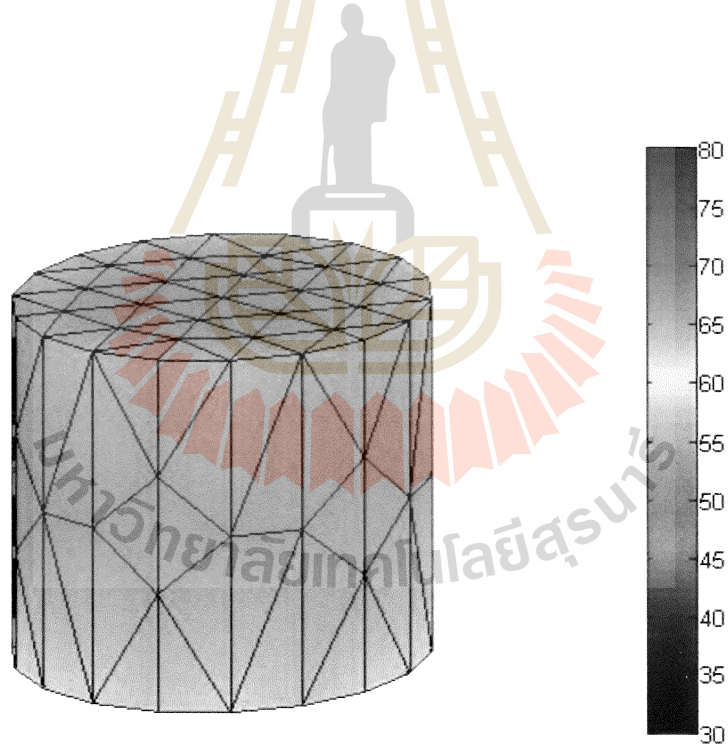
จ) ที่เวลา 40 วินาที



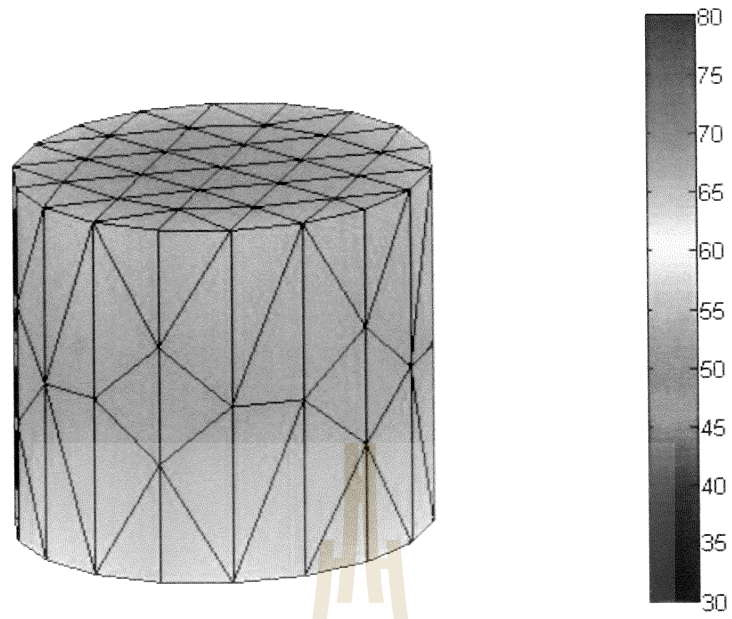
ฉ) ที่เวลา 50 วินาที



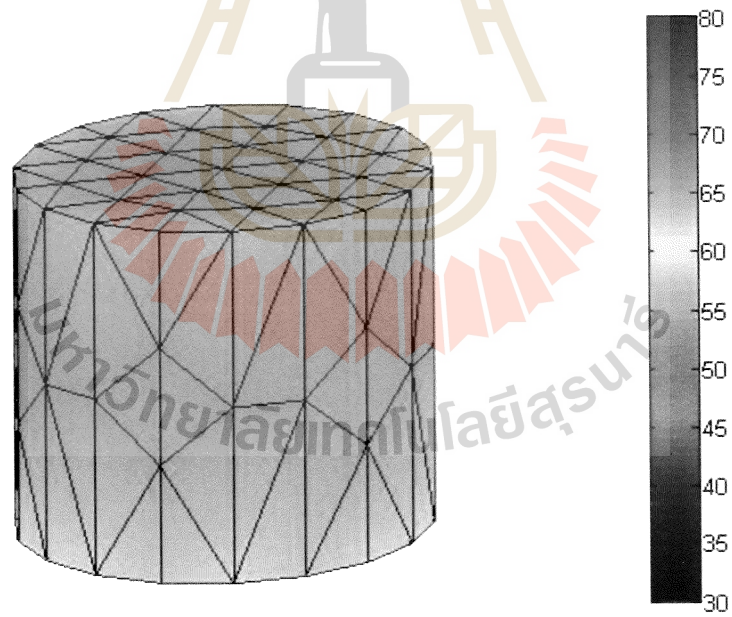
ข) ที่เวลา 60 วินาที



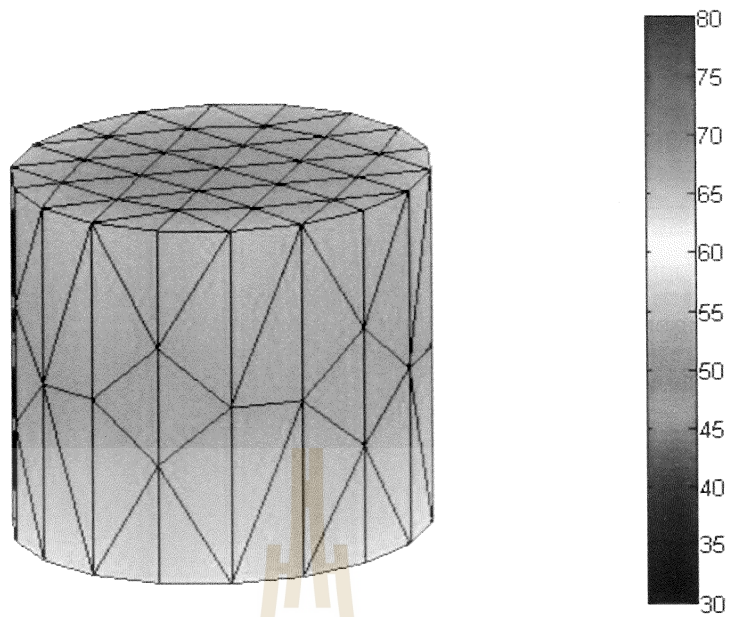
ค) ที่เวลา 70 วินาที



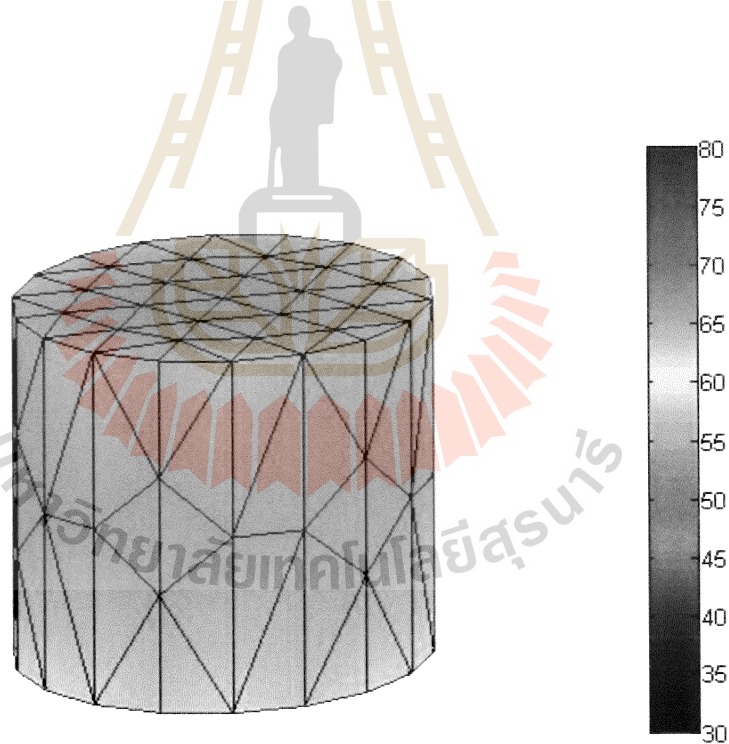
ณ) ที่เวลา 80 วินาที



ญ) ที่เวลา 90 วินาที

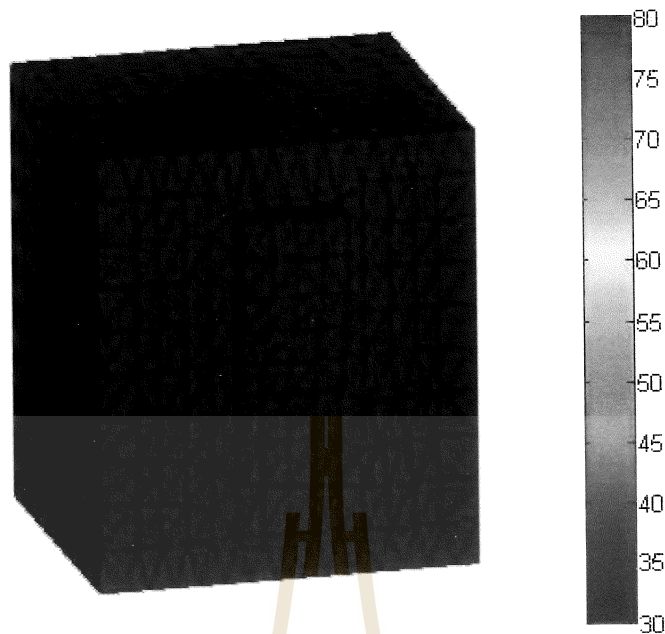


ฉ) ที่เวลา 100 วินาที



ฉ) ที่เวลา 110 วินาที

รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ในอาหาร เมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน ณ เวลาใดๆ

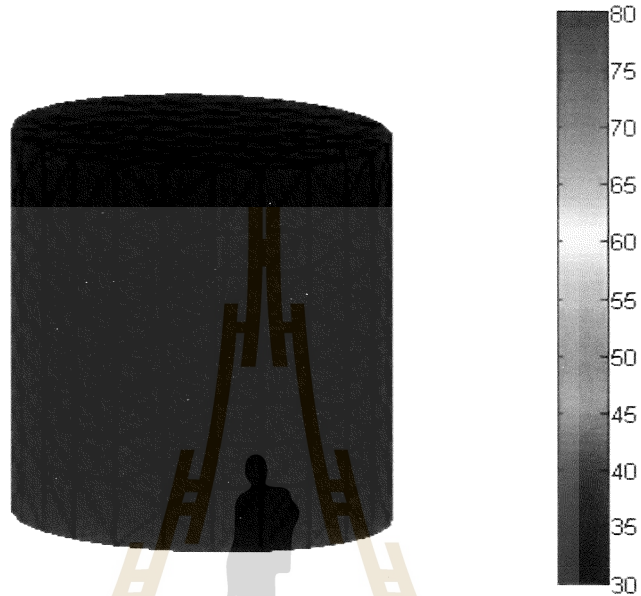


รูปที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน
ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน

จากผลเฉลยการจำลองค่าอุณหภูมิของโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นดังแสดงด้วยรูปที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารจากการหมุนงานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิกระจายตัวได้สม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากการหมุนงานไมโครเวฟนั้นทำให้อาหารทุกบริเวณหมุนผ่านแหล่งกำเนิดความร้อนอย่างต่อเนื่อง และผลของค่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิของอาหารอยู่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยกรณีนี้จะอยู่ในสภาวะคงตัว ณ เวลา 63.384 วินาที โดยจากรูปที่ 4.4 ก) จะมีค่าของอุณหภูมิในอาหารเท่ากับ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิแรกจากการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุก ๆ โหนดค่าคำตอบ และจากรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่า ที่ผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านนอกจะมีค่าอุณหภูมิมีค่าเป็น 30°C เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.4.3 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน

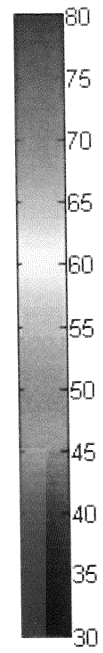
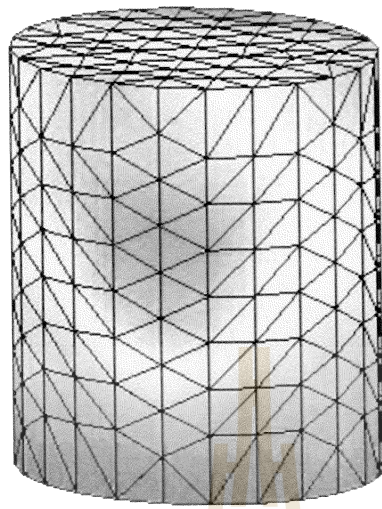
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และค่าอุณหภูมิที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



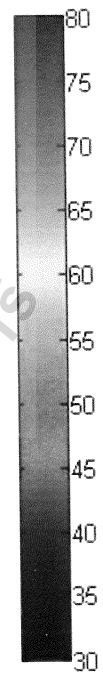
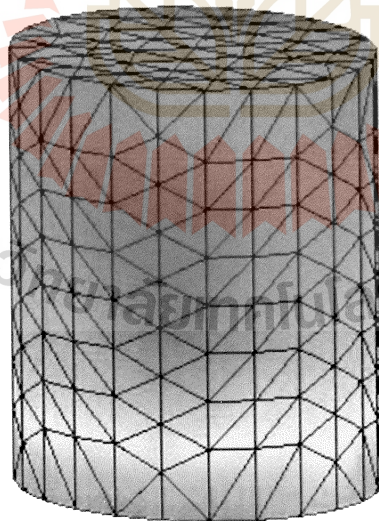
ก) ที่เวลา 0 วินาที



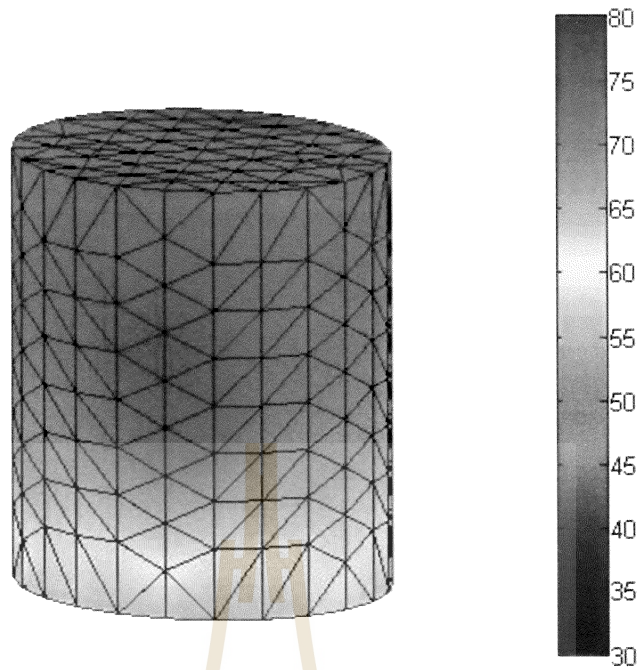
ข) ที่เวลา 10 วินาที



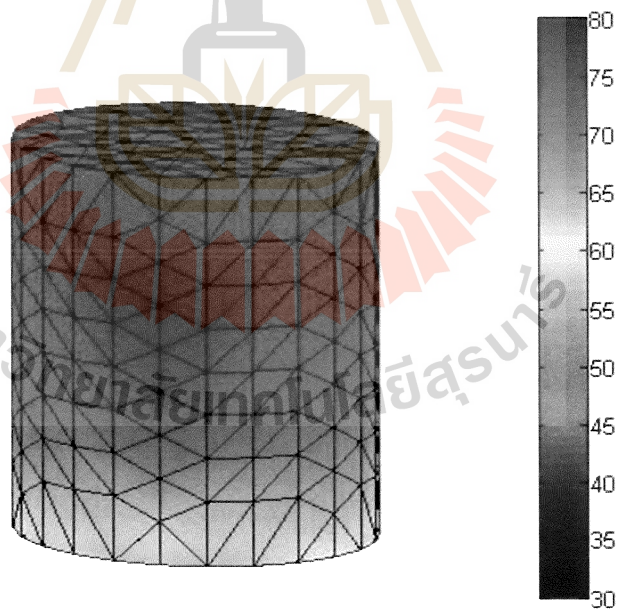
ค) ที่เวลา 20 วินาที



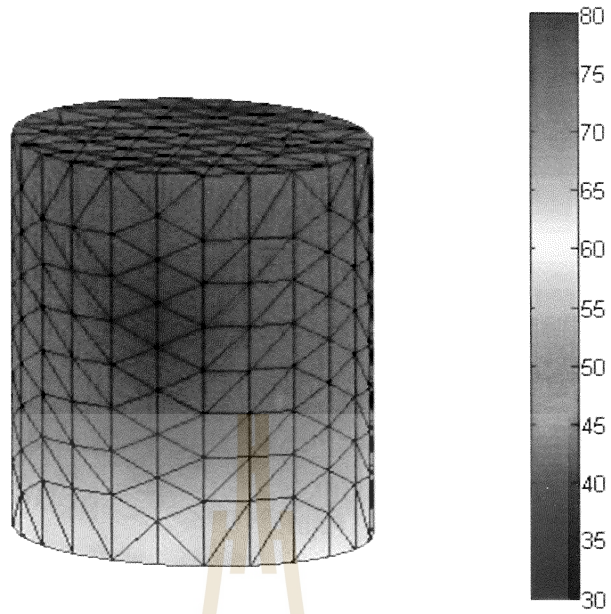
ง) ที่เวลา 30 วินาที



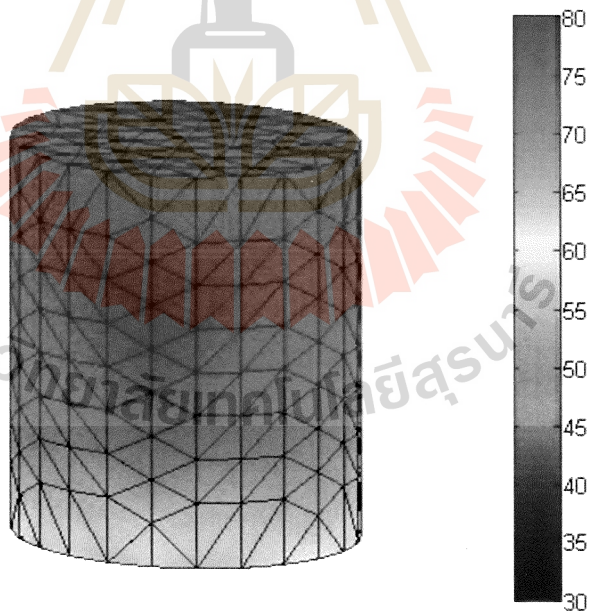
จ) ที่เวลา 40 วินาที



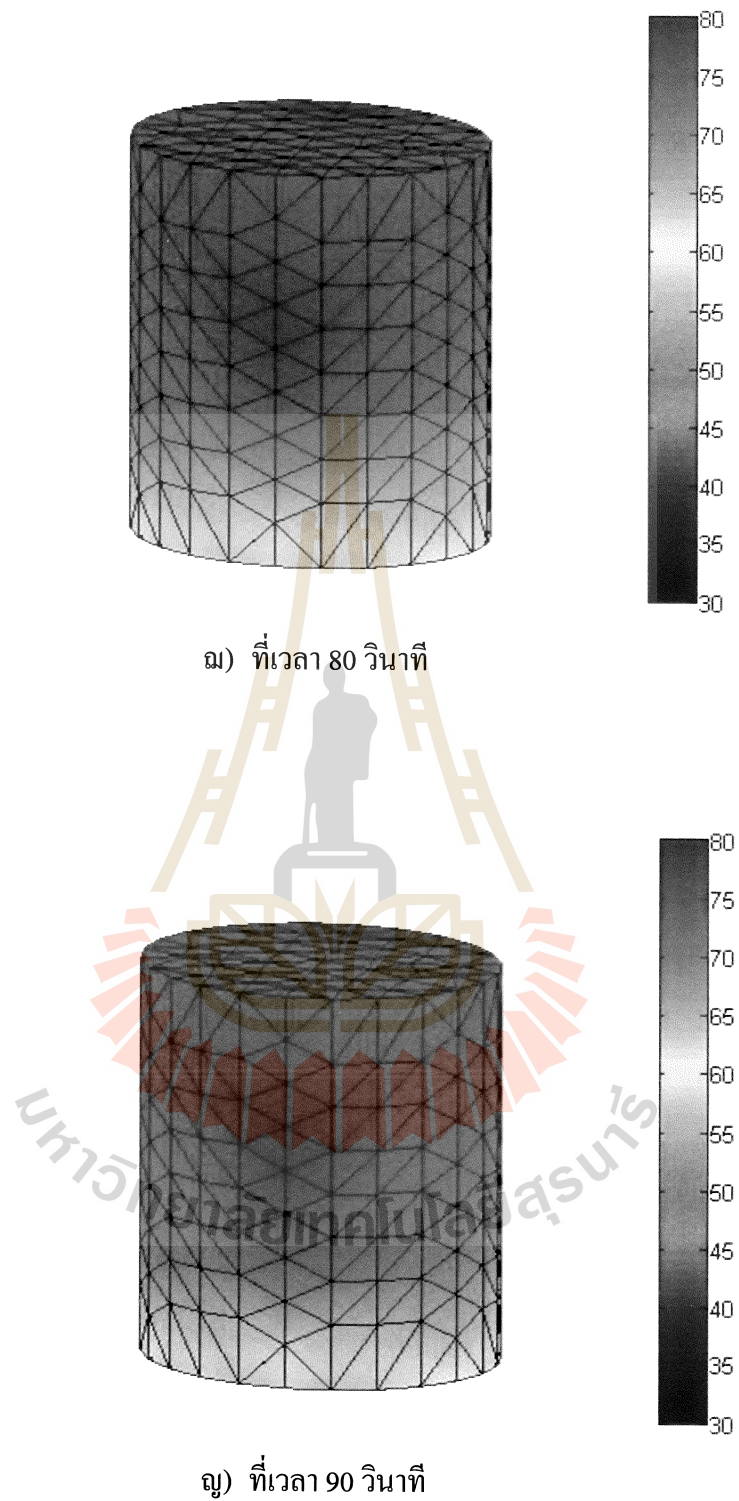
ฉ) ที่เวลา 50 วินาที



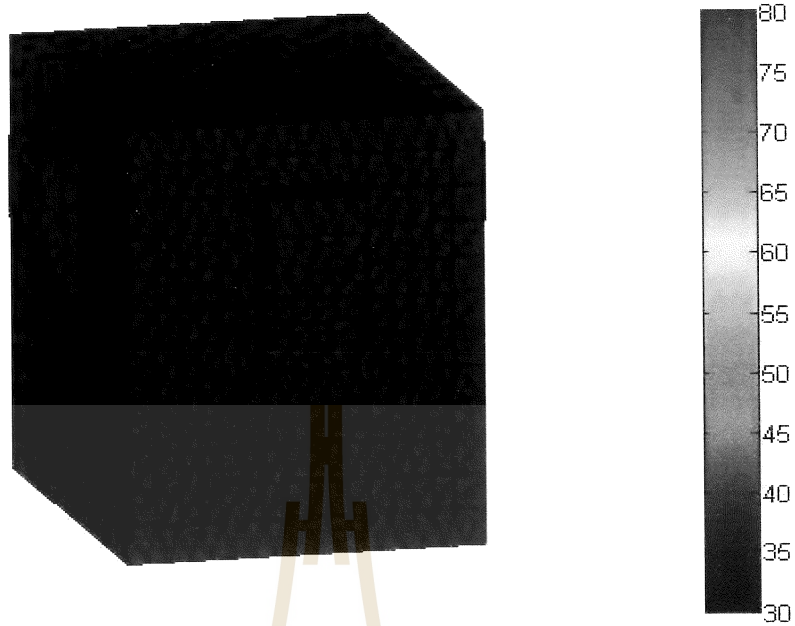
ข) ที่เวลา 60 วินาที



ข) ที่เวลา 70 วินาที



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ในอาหาร เมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน ณ เวลาใดๆ

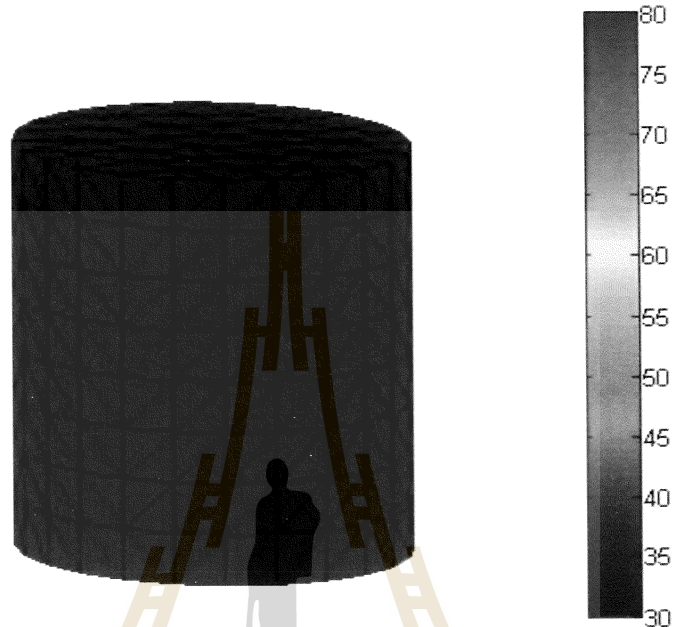


รูปที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 3 ด้าน
ซึ่งงานไมโครเวฟไม่หมุน

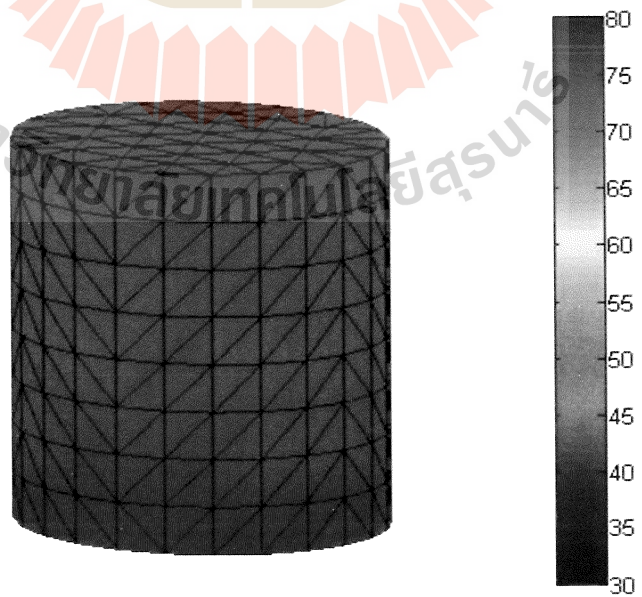
จากผลเฉลยการจำลองค่าอุณหภูมิของ โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่ได้จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารที่มีหน้าคลื่น 3 ด้าน ทำให้อุณหภูมิกระจายตัวได้สม่ำเสมอทั่วอาหาร เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดความร้อนมากขึ้น และผลของค่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิของอาหารอยู่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะอยู่ในสภาวะคงตัว ณ ที่เวลา 51.708 วินาที โดยจากรูปที่ 4.6 ก) จะมีค่าของอุณหภูมิในอาหารเท่ากับ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิแรกจากการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุกๆ โหนดค่าคำตอบ และจากรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่าที่ผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านนอกจะมีค่าอุณหภูมิมิมีค่าเป็น 30°C เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.4.4 กรณีพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีที่อุ่นถาด 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน

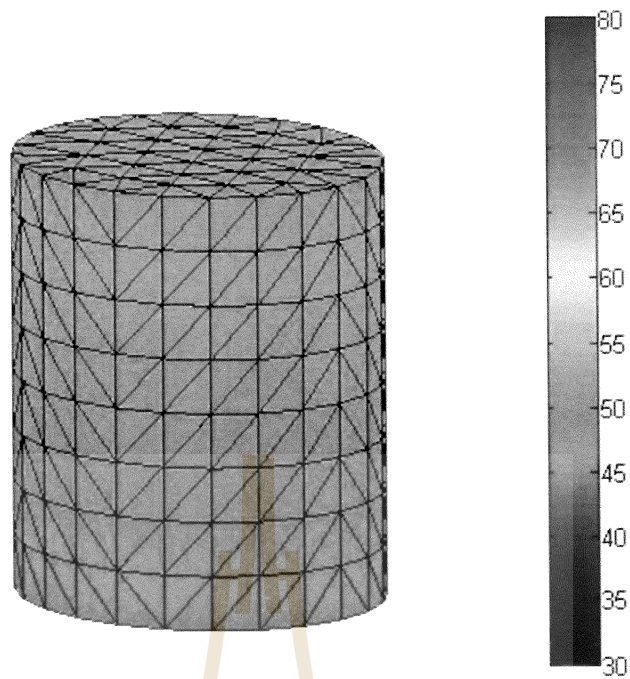
ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารเมื่อพิจารณาที่อุ่นถาด 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และค่าอุณหภูมิที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาที่อุ่นถาด 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



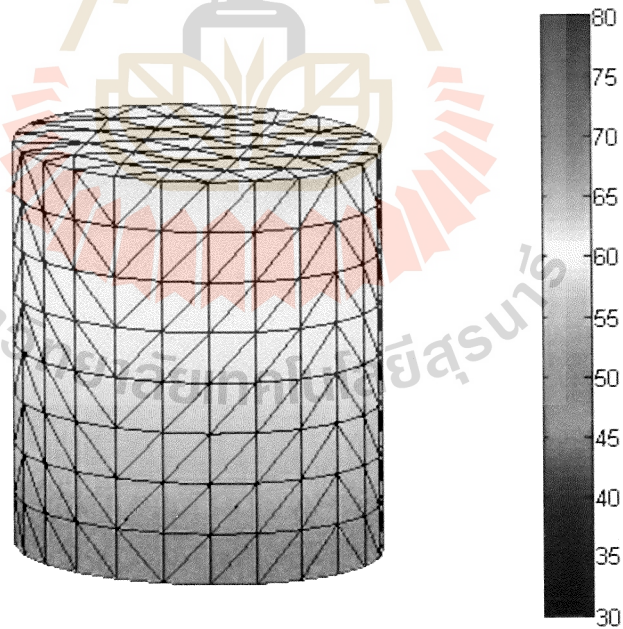
ก) ที่เวลา 0 วินาที



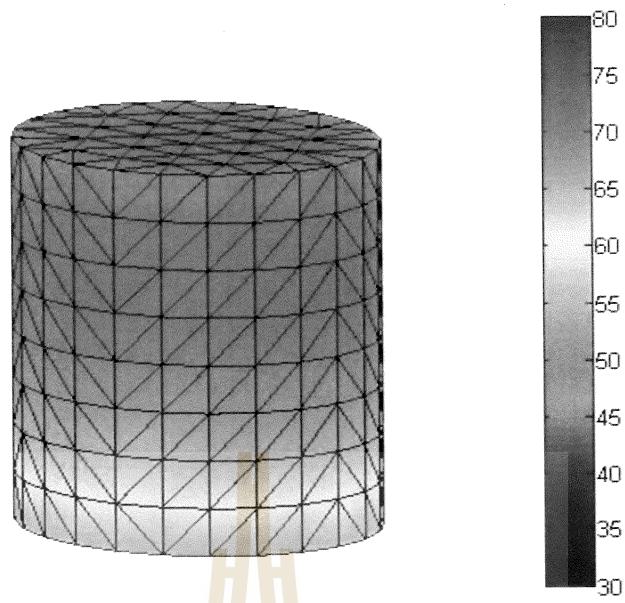
ข) ที่เวลา 10 วินาที



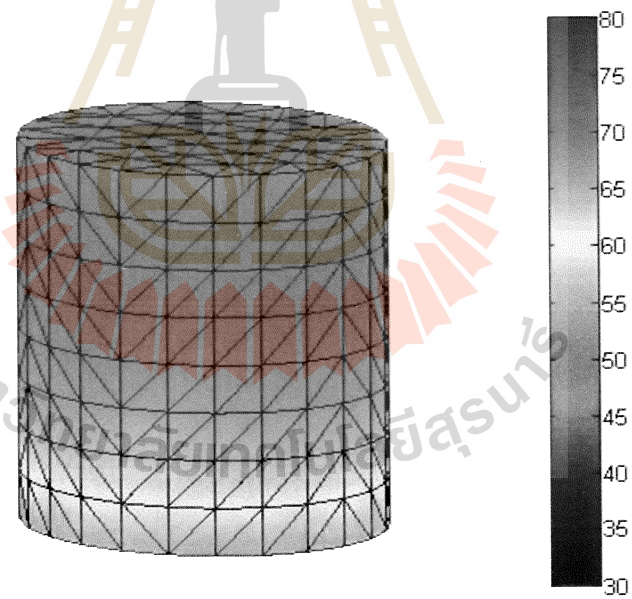
ค) ที่เวลา 20 วินาที



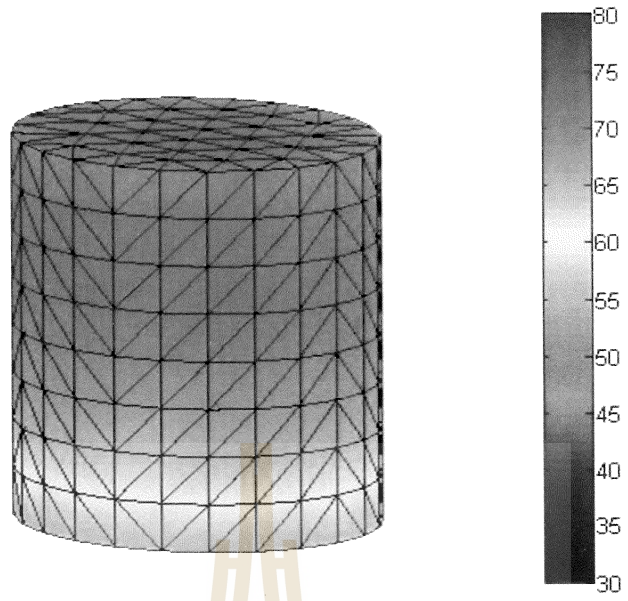
ง) ที่เวลา 30 วินาที



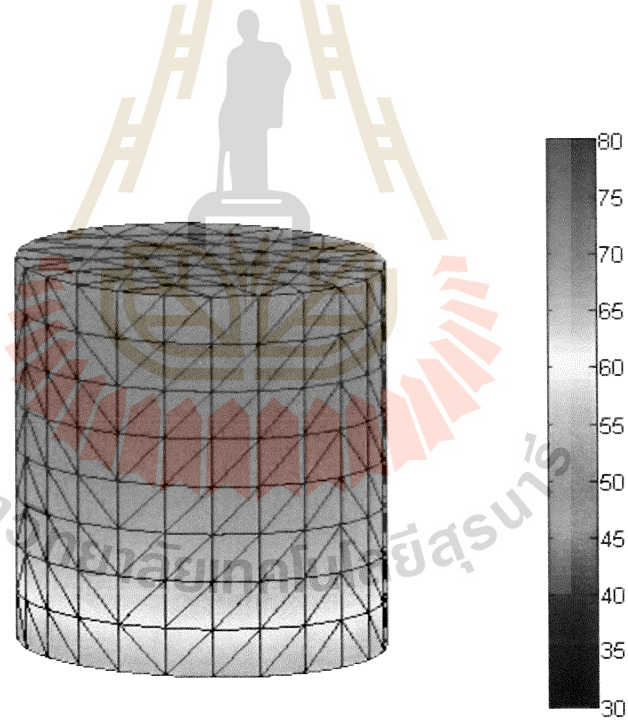
จ) ที่เวลา 40 วินาที



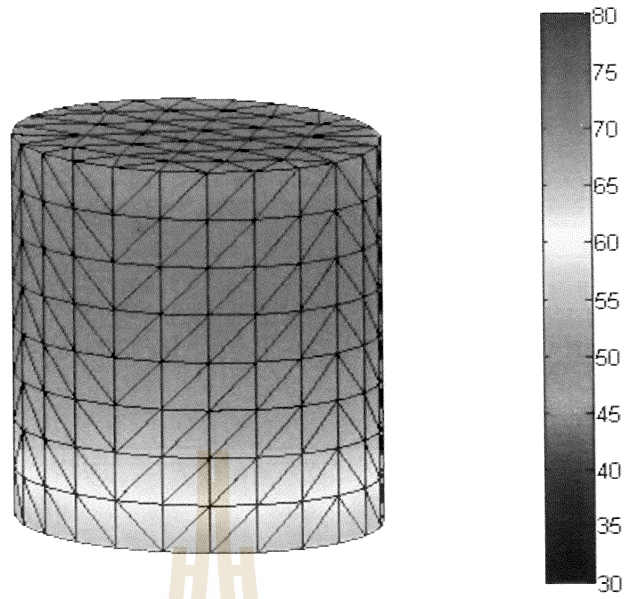
ฉ) ที่เวลา 50 วินาที



ข) ที่เวลา 60 วินาที



ค) ที่เวลา 70 วินาที



ณ) ที่เวลา 80 วินาที

รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ในอาหาร เมื่อพิจารณาเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน ณ เวลาใดๆ



รูปที่ 4.9 ค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ผิวของเตาไมโครเวฟเมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 3 ด้าน ซึ่งงานไมโครเวฟหมุน

จากผลเฉลยการจำลองค่าอุณหภูมิของโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 4.8 ผลลัพธ์ที่ได้จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารที่มีท่อนำคลื่น 3 ด้าน และการหมุนของจานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิกระจายตัวได้สม่ำเสมอที่สุด เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดความร้อนมากขึ้นและการหมุนจานไมโครเวฟนั้นทำให้อาหารทุกบริเวณหมุนผ่านแหล่งกำเนิดความร้อนอย่างต่อเนื่อง และผลของค่าอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิของอาหารอยู่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะอยู่ในสภาวะคงตัว ณ ที่เวลา 40.032 วินาที โดยจากรูปที่ 4.8 ก) จะมีค่าของอุณหภูมิในอาหารเท่ากับ 30°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิแรกจากการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุก ๆ โหนดค่าคำตอบ และจากรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าที่ผิวของผนังเตาไมโครเวฟด้านนอกจะมีค่าอุณหภูมิมีค่าเป็น 30°C เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาจานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน

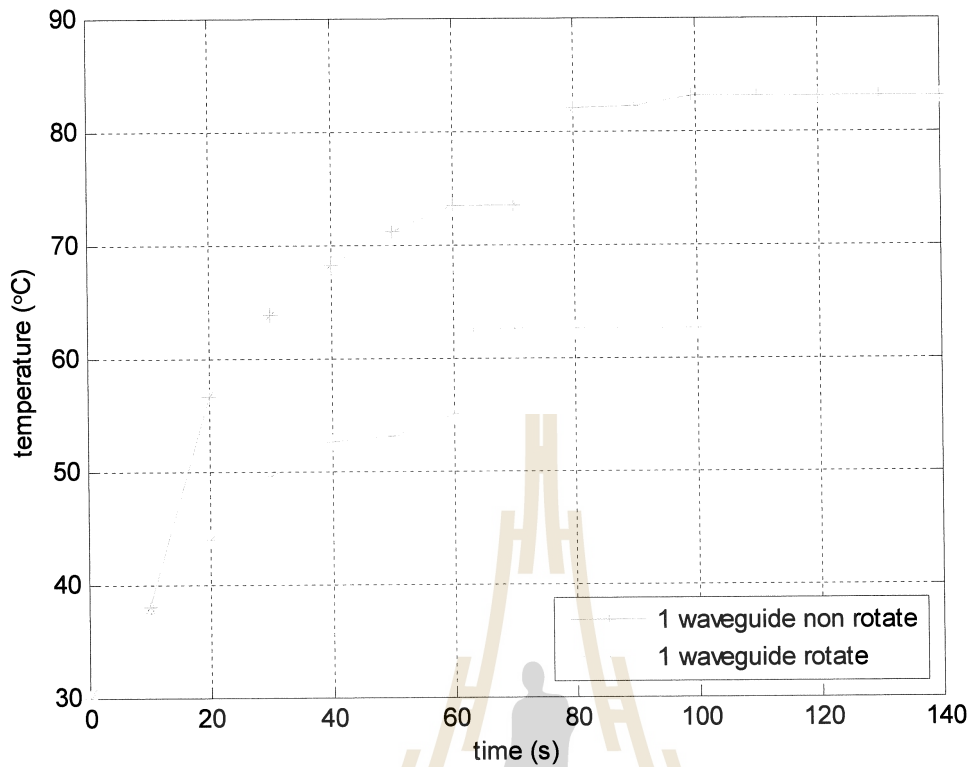
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ เปรียบเทียบระหว่างจานไมโครเวฟหมุนและจานไมโครเวฟไม่หมุน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

กรณีเปรียบเทียบท่อนำคลื่น 1 ด้าน

การเปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความร้อนภายในอาหารระหว่างท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบจานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาจานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีท่อนำคลื่น 1 ด้าน

ผลจากการจำลอง	ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบจานไมโครเวฟหมุน	ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบจานไมโครเวฟไม่หมุน
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.07	16.48
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	60.01	82.72
ค่าอุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)	62.50	83.02



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาจานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีที่ท่อนำคลื่น 1 ด้าน

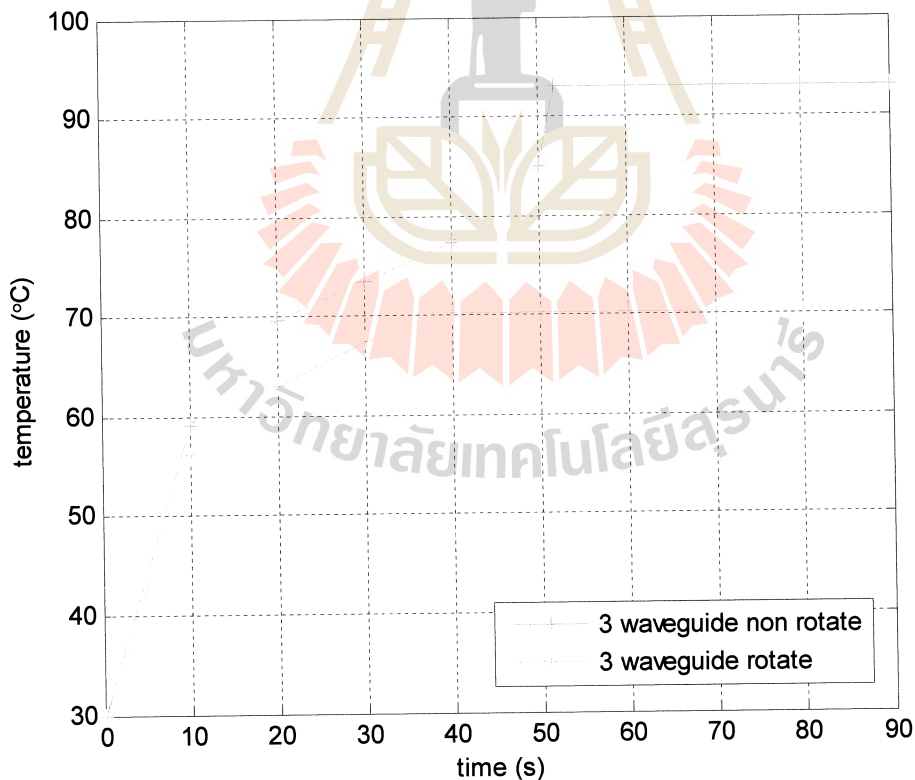
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบหมุนและไม่หมุน ด้วยโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเอง จะสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบหมุนนั้น จะกระจายตัวดีกว่าท่อนำคลื่น 1 ด้านแบบไม่หมุน โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า และอุณหภูมิในอาหารของท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบจานไมโครเวฟไม่หมุน จะมีค่าสูงกว่าท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบจานไมโครเวฟหมุน เนื่องจากการไม่หมุนจานไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนสะสมจึงทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงกว่าการหมุนจานไมโครเวฟ

กรณีเปรียบเทียบท่อนำคลื่น 3 ด้าน

การเปรียบเทียบผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความร้อนภายในอาหารระหว่างท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีท่อนำคลื่น 3 ด้าน

ผลจากการจำลอง	ท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน	ท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟไม่หมุน
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	9.289	12.01
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ (°C)	70.065	89.00
ค่าอุณหภูมิสูงสุด (°C)	70.15	93.00



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณางานไมโครเวฟหมุนและไม่หมุน กรณีท่อนำคลื่น 3 ด้าน

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบหมุนและไม่หมุน ด้วยโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเอง จะสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบหมุนนั้น จะกระจายตัวดีกว่าท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบไม่หมุน โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า และอุณหภูมิในอาหารของท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟไม่หมุน จะมีค่าสูงกว่าท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน เนื่องจากงานไมโครเวฟไม่หมุนนั้นจะทำให้เกิดความร้อนสะสม จึงทำให้อุณหภูมิมียุทธค่าสูงกว่างานไมโครเวฟหมุน

4.6 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิเมื่อพิจารณาจำนวนของท่อนำคลื่นที่แตกต่างกัน

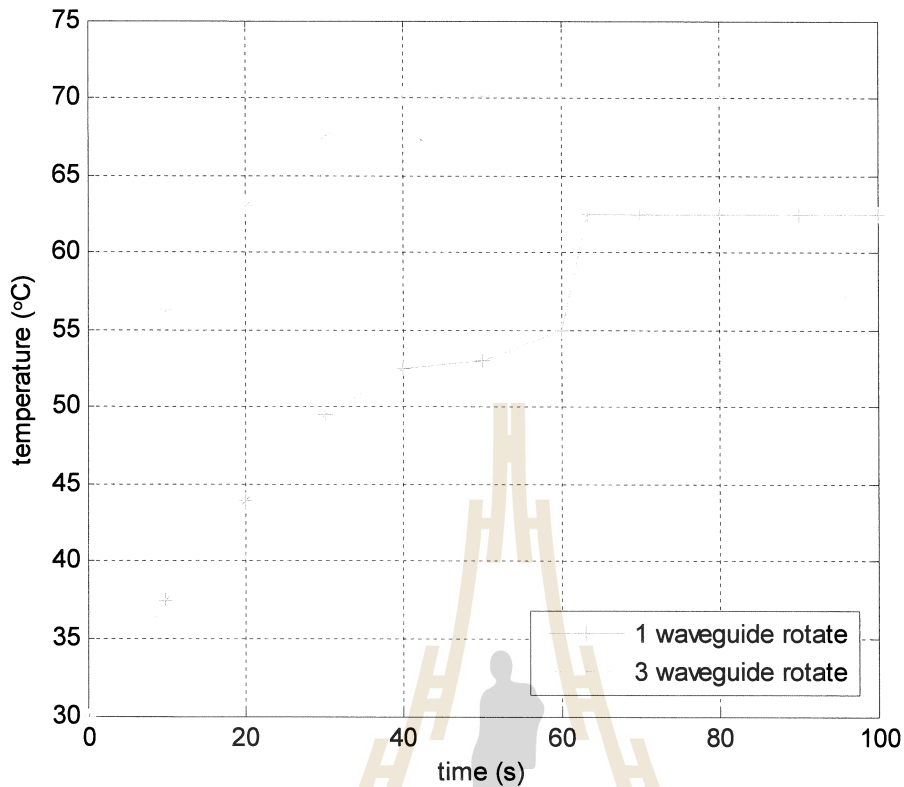
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน ซึ่งสามารถแสดงดังนี้

กรณีเปรียบเทียบงานไมโครเวฟหมุน

การเปรียบเทียบผลการจำลองความร้อนภายในอาหารและการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิระหว่างท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟหมุน

ผลจากการจำลอง	ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน	ท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.07	9.289
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ (°C)	60.01	70.065
ค่าอุณหภูมิสูงสุด (°C)	62.50	70.15
เวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (s)	63.384	40.032



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ
เมื่อพิจารณาที่หน้าคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟหมุน

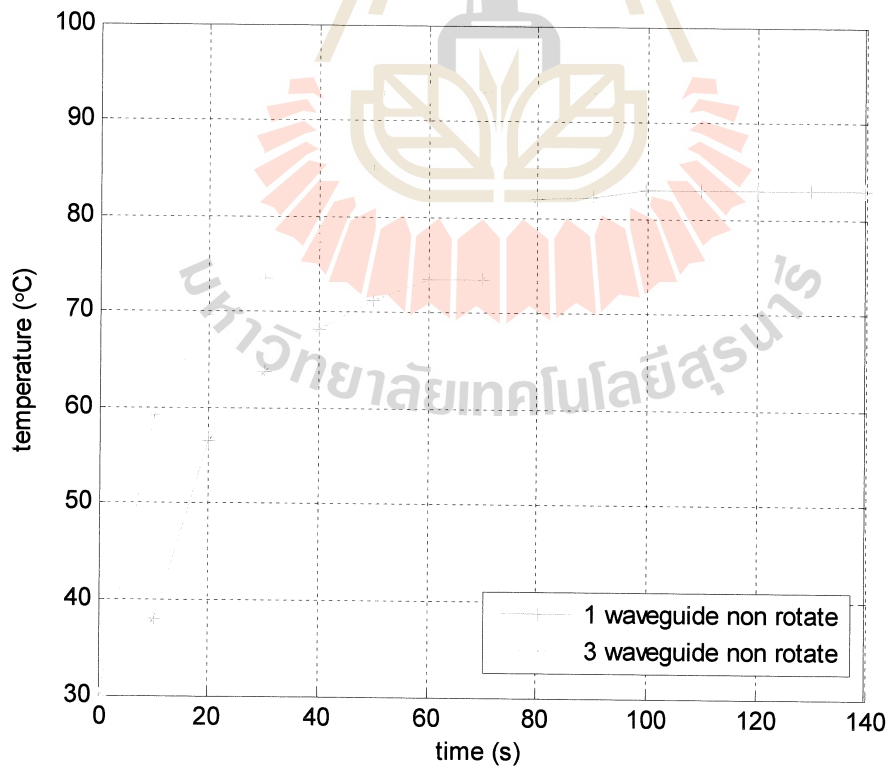
จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารแบบมีที่หน้าคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟหมุน ด้วยโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นเอง จะสังเกตเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในที่หน้าคลื่น 3 ด้าน นั้น จะกระจายตัวดีกว่าที่หน้าคลื่น 1 ด้าน โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า ซึ่งอุณหภูมิของอาหารแบบมีที่หน้าคลื่น 3 ด้าน จะมีค่าสูงกว่าที่หน้าคลื่น 1 ด้าน เนื่องจากปริมาณของที่หน้าคลื่นที่มีจำนวนมากขึ้น และการเพิ่มจำนวนของที่หน้าคลื่นนั้นส่งผลต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิได้เร็วขึ้น เนื่องจากปริมาณของที่หน้าคลื่นที่มีจำนวนมากขึ้น

กรณีเปรียบเทียบงานไมโครเวฟไม่หมุน

การเปรียบเทียบผลการจำลองความร้อนภายในอาหารและการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิระหว่างท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน แบบงานไมโครเวฟไม่หมุน แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟไม่หมุน

ผลจากการจำลอง	ท่อนำคลื่น 1 ด้าน แบบไม่หมุน	ท่อนำคลื่น 3 ด้าน แบบไม่หมุน
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	16.48	12.01
ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ (°C)	82.72	89.00
ค่าอุณหภูมิสูงสุด (°C)	83.02	93.00
เวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (s)	99.663	51.708



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน กรณีงานไมโครเวฟไม่หมุน

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน และ 3 ด้าน แบบจานไมโครเวฟไม่หมุน ด้วยโดยโปรแกรม FEM แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเอง จะสังเกตเห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น 3 ด้าน นั้น จะกระจายตัวดีกว่าท่อนำคลื่น 1 ด้าน โดยพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าน้อยกว่า ซึ่งอุณหภูมิของอาหารแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้านจะมีค่าสูงกว่าท่อนำคลื่น 1 ด้าน เนื่องจากปริมาณของท่อนำคลื่นที่มีจำนวนมากขึ้น และการเพิ่มจำนวนของท่อนำคลื่นนั้นส่งผลต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิได้เร็วขึ้น เนื่องจากปริมาณของท่อนำคลื่นที่มีจำนวนมากขึ้น

4.7 สรุป

บทที่ 4 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งแสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งโปรแกรมการจำลองผลอุณหภูมิ สามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 4.1 จากผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิที่ได้พบว่าอุณหภูมิจากการหมุนจานไมโครเวฟทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารสม่ำเสมอว่าการไม่หมุนจานไมโครเวฟและเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน นั้น ความร้อนภายในอาหารจะสูงกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน ประกอบกับเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน จะเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิในอาหารได้เร็วกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย และการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาไมโครเวฟ เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิ การจำลองผลใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเอง พร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้เป็นที่น่าเชื่อถือ

ในบทที่ 2 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคก้างของกาลเลอร์คิน ส่วนในบทที่ 3 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในเตาไมโครเวฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติ ได้เลือกใช้โปรแกรม Solid work จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าค่าสนามไฟฟ้าของเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้าน มีค่ามากกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของท่อนำคลื่น และในบทที่ 4 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผล และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมทั้งผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาไมโครเวฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ จากผลลัพธ์ของค่าอุณหภูมิที่ได้พบว่าอุณหภูมิจากการหมวนจานไมโครเวฟทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาหารสม่ำเสมอว่าการไม่หมวนจานไมโครเวฟ ซึ่งเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้านนั้น ความร้อนภายในอาหารจะมีค่าสูงกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน และเตาไมโครเวฟแบบมีท่อนำคลื่น 3 ด้านนั้น จะเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิในอาหารได้เร็วกว่าแบบมีท่อนำคลื่น 1 ด้าน

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. เลือกหาวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบเตาไมโครเวฟ ซึ่งจะทำให้อาหารมีความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของความร้อนมากขึ้น
2. พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ให้มีความรวดเร็วในการจำลองผลมากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). ทฤษฎีสถานมไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- นรินทร์ คำประเสริฐ. (2545). วิศวกรรมแม่เหล็กและวิศวกรรมไมโครเวฟ (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- นักสิทธิ์ คุ้มณาศัย. (2533). การถ่ายเทความร้อน (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสิ้นเปลืองโดยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุกัญญา ทัพศรี. (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิรอบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาติ. (2545). เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- อาคม แก้วระวัง. (2548). สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (พิมพ์ครั้งที่ 3). ขอนแก่น: สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Bengtsson, N., and Lycke, E. (1969). Experiments with a heat camera for recording temperature distribution in foods during microwave heating. *Journal of Microwave Power*. 4(2): 48-54.
- Birla, S.L., Wang, S., and Tang, J. (2013). Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water. *Journal of Food Engineering*. 84 (2): 270-280.
- Dahl, C.A., Matthews, M.E., and Lund, D.B. (1981). Effect of microwave heating in cook-chill food-service system. *Journal of the American Dietetic Association*. 79(3): 296-301.
- Datta, A.K., Geedipalli, S.S.R., and Almeida, M.F. (2005). Microwave combination heating. *Food Technology*. 59(1): 36-40.

- Datta, A.K., and Ni, H. (2002). Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. **Journal of Food Engineering**. 51(4): 355–364.
- Fleischman, G.J. (2011). Predicting temperature range in food slabs undergoing long term/low power microwave heating. **Journal of Food Engineering**. 27 (4): 337–351.
- Fraile, P., and Burg, P. (1997). Reheating of a child dish of mashed potatoes in a superheated steam oven. **Journal of Food Engineering**. 33 (1): 57–80.
- Geedipalli, S.S.R., Rakesh, V., and Datta, A.K. (2007). Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. **Journal of Food Engineering**. 359–368
- George, J., and Bergman, R. (2006). Selective Re-Meshing: A new approach to include mode stirring effects in the steady state FDTD simulation of microwave heating cavities. **Microwave and Optical Technology Letters**. 48(6): 1179–1182.
- Huebner, K.H., Dewhurst, D.L., Smith, D.E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Igarashi, and Han. (2002). On convergence of ICCG applied to finite-element equation for quasi-static fields. **IEEE Transactions on Magnetics**. 38 (2): 565–568.
- Lin, Y.E., Anantheswaran, R.C., and Puri, V.M., (2013). Finite element analysis of microwave heating of solid foods. **Journal of Food Engineering**. 25 (1): 85–112.
- Ma, L.H., Paul, D.L., Potheary, N., Railton, C., Bows, J., and Barratt, L. (1995). Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal FDTD model of a microwave-heating process. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 43(11): 2565–2572.
- Mao, W., Watanabe, M., and Sakai, N. (2005). Analysis of temperature distributions in kamaboko during microwave heating. **Journal of Food Engineering**. 71 (2): 187–192.
- Marshall, M.G., and Metaxas, A.C. (1998). Modelling of the radio frequency electric field strength developed during the RF assisted heat pump drying of particulates. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. 33 (3): 167–177.
- Ni, H., Datta, A.K., and Torrance, K.E. (1999). Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: A multiphase porous media model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 1501–1512.

- Nooradzianie, M.Z., Mohammad, Z.M.J., and Farhana, A.P. (2011). Measurements and Reduction of Microwave Oven Electromagnetic Leakage. **IEEE International RF and Microwave Conference**. 305-307.
- Nott, K.P., and Hall, L.D. (2005). Validation and cross-comparison of mri temperature mapping against fiber optic thermometry for microwave heating of foods. **International Journal of Food Science and Technology**. 723–730.
- Pathak, S., Liu, F., and Tang, J. (2003). Finite difference time domain (FDTD) characterization of a single mode applicator. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. 38 (1): 37–41.
- Plaza, P., Monzo, J., Sanchez, D. (2014). New approach for the prediction of the electric field distribution in multimode microwave heating applicators with mode stirrers. **IEEE Trans. Magn.** 40 (3): 1672–1678.
- Sakai, N., Wang, C., and Watanabe, M. (2004). An analysis of temperature distribution in microwave heating of foods with non-uniform dielectric properties. **Journal of Chemical Engineering of Japan**. 37 (7): 858–862.
- Sakai, N., Mao, W., and Watanabe, M. (2005). A method for developing model food system in microwave heating studies. **Journal of Food Engineering**. 66 (4): 525–531.
- Shixiong, L., Mika, F., and Noboru, S. (2013). A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating. **Journal of Food Engineering**. 115: 49–62.
- Shou-Zheng, Z., and Han-Kui, C. (1988). Power distribution analysis in rectangular microwave heating applicator with stratified load. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. 23(2): 139–143.
- Wappling-Raaholt, B., Scheerlinck, N., Galt, S., Banga, J. R., Alonso, A., and Balsa-Canto, E. (2014). A combined electromagnetic and heat transfer model for heating of foods in microwave ovens. **Journal of Microwave Power and Magnetron**. 37(2): 97–111.
- Zhou, L., Puri, V., Yeh K., and Gren X. (2013). Finite element modeling of heat and mass transfer in food material during microwave-model development and validation. **Journal of Food Engineering**. 25(4): 509-529.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก จากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยด้าน Applied FEM for Electromagnetic Field, for Electrical Machine, and for Heat Transfer และ Applied AI มีผลงานวิจัยตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 50 เรื่อง จดสิทธิบัตร 1 ผลงาน และลิขสิทธิ์ โปรแกรม 3 ผลงาน

นางสาวอิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์พัฒนา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2556 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอน ปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์อุณหภูมิโดยใช้ FEM รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ FEM ในงาน ระบบไฟฟ้ากำลัง