

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาความถูกต้อง
สำหรับระบบการวัดระดับ

THE FINITE ELEMENT APPLICATION IN THE ACCURACY ANALYSIS
FOR THE LEVEL MEASUREMENT SYSTEM



กพ.
4488ก
2551

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 87866
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2552

b. 120 X 150 X
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2008-EN-M-060-187
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE FINITE ELEMENT APPLICATION IN THE ACCURACY ANALYSIS
FOR THE LEVEL MEASUREMENT SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATIONS ENGINEERING
FACALTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายใน KMUTL-2008-EN-M-060-187 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2008

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาความ
ถูกต้องสำหรับระบบการวัดระดับ

นักศึกษา

นารีรัตน์ บุญสูง

รหัสนักศึกษา

46061706

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2551

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ประภาย อุคคกิมพันธ์

บทคัดย่อ

การวัดระดับโดยใช้เรดาร์ เป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูงทั้งยังมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาใน ข้อจำกัด ของ สาร เช่น สารบางตัวมีการกัดกร่อน สารบางตัวมีความหนาแน่นไม่คงที่, รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เนื่องจาก ไม่มี ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้อุปกรณ์การวัดแบบเรดาร์ เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรมและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม พบว่า การใช้งานเรดาร์ในการวัดระดับมีการอ่านค่าเบี่ยงเบนไปจากระดับที่เกิดขึ้นจริงหลังจากมีการติดตั้งใช้งานไปแล้วระยะหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอากรณีศึกษา มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการอ่านค่าที่เบี่ยงเบนไป โดยใช้เทคนิควิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Thesis Title	The Finite Element Application in The Accuracy Analysis for the Level Measurement System
Student	Miss Nareerat Boonsung
Student ID.	46061706
Degree	Master of Engineering
Program	Instrument Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Prapart Ukakimapan

ABSTRACT

Radar is one choice for level measurement in the petrochemical industries with high of accuracy The radar provides a non-contact sensor that is virtually unaffected by changing in the temperature process, pressure or the gas vapor composition within a vessel. The measurement accuracy is unaffected by change in density, conductivity and dielectric constant of product being measure or by air movement above the product. These benefit have become more significant to the process industry since the advent of low maintenance cost due to no moving part that the reason Radar are popular for industrial in present. However we found that some measurement value deviates from the actual level after the radar is in operation for few years. We have used Finite Element Technique to investigate for deviation, as our case study.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และให้คำปรึกษาจาก รศ.ประภาช อุคคกิตมาพันธุ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณ สัมพันธ์ ชชาติริณ บริษัท PURAC (Thailand), ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล ในการทำวิจัย ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ บริษัท Emerson (Thailand) ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นที่กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆตลอดจนคณะกรรมการสอบทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นาริรัตน์ บุญสูง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องมือวัดระดับแบบเรดาห์.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 สมการของแมกซ์เวลล์.....	4
2.3 การทดลองของเฮิร์ตซ์และการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.4 โมเมนตัมและความดันรังสี.....	10
2.5 การแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสาร.....	12
2.6 สเปกตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.7 การสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.8 ชนิดของเรดาห์.....	19
2.8.1 แบบคลื่นแบบต่อเนื่อง.....	19
2.8.2 แบบรวมความถี่กับคลื่นแบบต่อเนื่อง.....	20
2.8.3 แบบพัลส์เรดาห์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความถูกต้องสำหรับระบบการวัดระดับในกรณีศึกษา.....	22
3.1 บทนำ.....	22
3.2 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์.....	28
3.3 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์.....	32
3.4 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์ กับของแข็ง.....	34
3.4.1 สมการเชิงอนุพันธ์.....	34
3.4.2 สมการไฟไนต์อิลิเมนต์.....	35
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง.....	39
4.1 บทนำ.....	39
4.2 การทดลอง และผลการทดลอง.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. การใช้โปรแกรม ANSYS.....	53
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็น.....	15
2.2 ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ.....	18



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การทดลองของเฮิร์ตซ์.....	7
2.2 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.3 การเกิดแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.4 เครื่องบินเคลื่อนที่ตรงไปหาเรดาร์แบบคลื่นต่อเนื่อง.....	19
2.5 หลักการของ เรดาร์แบบรวมความถี่กับคลื่นแบบต่อเนื่อง.....	20
3.1 แสดงกระบวนการผลิตทำการควบคุมระดับสารแลคติกส์ในกรณีศึกษา.....	22
3.2 การแกว่งของสัญญาณ เรดาร์อ่านค่าเพี้ยนไป(1).....	23
3.3 การแกว่งของสัญญาณ เรดาร์อ่านค่าเพี้ยนไป(2).....	24
3.4 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งเรดาร์จาก N2 ไปอยู่ที่ตำแหน่ง N3 แทน.....	25
3.5 สัญญาณควบคุมที่อ่านได้หลังจากการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง.....	25
3.6 ลักษณะการกระจายคลื่นของเรดาร์.....	26
3.7 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นออลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์.....	28
3.8 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์แบบต่าง ๆ.....	29
3.9 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยจุดสามจุดต่อ โดยมีค่าไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ.....	30
3.10 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ในการคำนวณการขยับตัวของรถ.....	33
3.11 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นระนาบ.....	34
3.12 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ.....	36
3.13 การแปลงแรงดึงตลอดขอบไปสู่ที่จุดต่อ.....	37
4.1 ถึงสารเคมี.....	40
4.2 รูปร่างที่สร้าง ตามขนาดของถังจริง.....	41
4.3 รูปร่างที่ถูกกำหนดอิลิเมนต์ย่อยแบบสามเหลี่ยมไว้ระเบียบ.....	42
4.4 แสดงสมบัติต่างๆของโลหะ.....	43
4.5 แสดงอุณหภูมิภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	44
4.6 แสดงค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	45
4.7 แสดงค่าแรงจากภายนอกที่มากระทำ ภายใต้สภาวะแวดล้อม.....	45
4.8 แสดงค่าความเครียดวิกฤติ.....	46
4.9 แสดงค่าความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ.....	47
4.10 แสดงค่าความเค้นแบบคี่รูปภายใต้สภาวะปกติ (1).....	47
4.11 แสดงค่าความเค้นแบบคี่รูปภายใต้สภาวะปกติ (2).....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 แสดงค่าความเค้นปกติ(1).....	48
4.13 แสดงค่าความเค้นปกติ(2).....	49
4.14 แสดงค่าความเค้นแบบคั่นรูปภายใต้สภาวะวิกฤติ.....	49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดระดับโดยใช้เรดาห์ ที่เป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตเคมี ที่ให้ความเที่ยงตรงในการวัดสูง สามารถใช้กับสารเคมีได้อย่างหลากหลาย ทั้งที่มีการกัดกร่อน หรือมีความเข้มข้นสูง เนื่องจาก ไม่มีชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีโดยตรง ทั้งยังไม่ต้องคำนึงถึงค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่

การใช้งานเรดาห์ในการวัดระดับบางครั้งพบว่าค่าที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากระดับที่เกิดขึ้นจริงหลังจากที่มีการติดตั้งใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง ในขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระบวนการควบคุม ดังกรณีศึกษาที่นำมาทำการวิจัย โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเอาเทคนิควิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์ในส่วนของโครงสร้างของถังซึ่งคาดว่าจะมีผลกระทบต่อการวัดระดับที่คลาดเคลื่อนไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อสืบค้นความผิดพลาดในการอ่านค่าของเรดาห์ในกรณีศึกษาดังกล่าว พร้อมทั้งหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขในลำดับต่อไป โดยได้นำเอาเทคนิควิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากกรณีศึกษาที่นำมาทำการสืบค้นหา ความผิดพลาดในการอ่านค่าของอุปกรณ์การวัดชนิดเรดาห์ พบว่าเรดาห์ได้ถูกติดตั้งใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งและสามารถอ่านค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อเวลาผ่านไป พบว่า ค่าที่เรดาห์อ่านได้มีความผิดพลาดไปจากระดับที่เกิดขึ้นจริง ในขณะที่เรดาห์ไม่มีความเสียหายใดๆและกระบวนการผลิตยังคงเดิม จากเหตุการณ์ดังกล่าวคาดว่าเรดาห์อ่านค่าผิดพลาดไปเนื่องจาก การเบี่ยงเบนไปของคลื่นของเรดาห์อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากส่วนความถี่ตัวของโครงสร้างของถัง และเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาเทคนิควิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เรดาห์อาศัยหลักการของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเบื้องต้นเพื่อทราบถึงคุณสมบัติ และพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว และเพื่อเป็นการสืบค้นความผิดพลาดในการอ่านค่าของเรดาห์ที่คิดเพิ่มขึ้นไป จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของถังตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อสืบค้นความผิดพลาดในการอ่านค่าของเรดาห์ที่คิดเพิ่มขึ้นไปโดยใช้เทคนิควิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการวิเคราะห์ เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไขในลำดับต่อไป รวมทั้งศึกษาถึงทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นหลักการทำงานของเรดาห์เพื่อทำความเข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลกระทบกับการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการอ่านค่าเรดาห์ที่คิดเพิ่มขึ้นไป

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 บทด้วยกันดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการ และทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องมือวัดระดับแบบเรดาห์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความถูกต้องสำหรับระบบการวัดระดับในกรณีศึกษา

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องมือวัดระดับแบบเรดาร์

2.1 บทนำ

หลักการทำงานของเรดาร์อาศัยหลักการคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคลื่นวิทยุ ซึ่งถูกค้นพบ โดย เจมส์คลากส์ แมกซ์เวลล์ ซึ่งจากการศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสเหนี่ยวนำจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ตามกฎของฟาราเดย์ ต่อมาในปีค.ศ. 1864 แมกซ์เวลล์ได้เสนอ สมมติฐานในทางกลับกันว่า ถ้าบริเวณใดมีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้เกิด สนามแม่เหล็กขึ้น ณ บริเวณรอบๆ การเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะบริเวณนั้นจะเป็นตัวนำ ฉนวน หรือสุญญากาศ แมกซ์เวลล์ยังได้อธิบายและขยายผลการทดลองของฟาราเดย์ให้กว้างขึ้นอีก กล่าวคือฟาราเดย์ พบแต่เพียงว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น บริเวณใกล้เคียงตลอดตัวนำ แต่แมกซ์เวลล์ขยายผลต่อไปอีกว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น บริเวณรอบๆ การเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะบริเวณนั้นจะเป็นสุญญากาศ ฉนวน ตัวนำหรือ ตัวกลางใดๆ นอกจากนี้ เมื่อสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามอีกชนิดหนึ่ง ณ บริเวณใกล้เคียงเสมอ โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กนี้ เป็นการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic disturbance) แก่ตัวกลางการรบกวนดังกล่าวจะแผ่ออกไปด้วยอัตราเร็วแสงและมีสมบัติเป็นคลื่นเรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นระนาบ มีทิศทางการแผ่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยจะถ่ายโอนพลังงานกับสิ่งต่างๆ ตามวิถีการแผ่ และนำพาโมเมนตัม ตกกระทบพื้นผิวเกิดความดันรังสี ทำให้มีการดูดกลืนรังสีและการสะท้อน ซึ่งจะได้กล่าวถึงทั้งในสุญญากาศและสาร สำหรับการแยกรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นความถี่หรือความยาวของคลื่นต่างๆ นั้นเรียกว่าสเปกตรัม (Spectrum) ได้แก่ คลื่นวิทยุ และคลื่นจุลภาค รังสีอินฟราเรด แสงที่ตามองไม่เห็น รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีแกมมา เป็นต้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น เหมือนกับคลื่นชนิดอื่น ๆ แต่จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายในปัจจุบัน เช่น การสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ เครื่องเรดาร์สำหรับการตรวจหาระยะหรือตำแหน่งของวัตถุด้วยเครื่องจุลภาค ภาพถ่ายที่ไวต่อรังสีอินฟราเรด การฆ่าจุลชีพและใช้ในทางการแพทย์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต การรักษามะเร็งด้วยรังสีเอ็กซ์ การฉายรังสีแกมมาเพื่อทำลายจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์การเกษตร และในอนาคตจะต้องมีการพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ อีกมาก ซึ่งจะทำการศึกษาค้นคว้ากันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการของแมกซ์เวลล์

แมกเวลล์ได้เสนอสมการพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าและการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันเป็นรากฐานสำคัญที่จะก่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้ามายิ่งขึ้น เรียกว่าสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ซึ่งประกอบด้วย 4 สมการ ดังต่อไปนี้

$$\oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า} \quad (2.1)$$

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad \text{กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก} \quad (2.2)$$

$$\oint E \cdot dI = \frac{d\phi_B}{dt} \quad \text{กฎของฟาราเดย์} \quad (2.3)$$

$$\oint B \cdot dI = \mu_0 (I + I_D) = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right) \quad \text{กฎของแอมแปร์ - แมกซ์เวลล์} \quad (2.4)$$

สมการ (2.1) กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า อธิบายเกี่ยวกับฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิ ที่ผ่านพื้นผิวปิดคือ อินทิกรัลเชิงพื้นผิวของผลคูณแบบสเกลาร์ระหว่างสนามไฟฟ้า E กับพื้นที่เวกเตอร์น้อยยิ่ง dA เท่ากับอัตราส่วนของประจุไฟฟ้าสุทธิ q ที่ถูกล้อมรอบอยู่ภายในพื้นผิวปิดกับสภาพยอมในปริภูมิเสรีหรือสุญญากาศ ϵ_0 โดยกฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้านี้เปรียบเสมือนเป็นกฎของคูลอมบ์นับทั่วไป ซึ่งใช้ได้เฉพาะไฟฟ้าสถิตที่มีประจุอยู่นิ่งหรือสนามไฟฟ้ามีค่าคงตัวเมื่อเทียบกับเวลาหรือฟังก์ชันของเวลาอีกด้วย

สมการ (2.2) กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก อธิบายเกี่ยวกับฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิ ϕ_B ที่ผ่านพื้นผิวปิดคือ อินทิกรัลเชิงพื้นผิวของผลคูณแบบสเกลาร์ระหว่างสนามไฟฟ้า B กับพื้นที่เวกเตอร์น้อยยิ่ง dA เท่ากับศูนย์ กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กนี้ยังใช้ไม่ได้กับสนามแม่เหล็กมีค่าคงตัวเมื่อเทียบกับเวลากับสนามแม่เหล็กแปรค่าตามเวลา แต่ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิเท่ากับศูนย์หรือฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งเข้าเท่ากับฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งออก ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างแม่เหล็กกับไฟฟ้าเกี่ยวกับสมบัติที่ที่ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป กล่าวคือ มีประจุอิสระในลักษณะของประจุบวกและประจุลบ แต่ไม่มีขั้วแม่เหล็กเพียงขั้วเดียวโดยอิสระ

สมการ (2.3) กฎของฟาราเดย์ อธิบายเกี่ยวกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าคือ อินทิกรัลเชิงเส้นรอบวิถีปิดของผลคูณแบบสเกลาร์ระหว่างสนามไฟฟ้า E กับการกระจัดน้อยยิ่ง dI เท่ากับผลค่าลบของอัตราแลกเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเวลา โดยที่เครื่องหมายลบแสดงถึงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศต่อต้านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็ก สำหรับการกำหนดทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะใช้กฎของเลนซ์

สมการ (2.4) กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ เป็นการขยายกฎของแอมแปร์ให้สามารถใช้ได้กว้างขวางขึ้น เนื่องจากกฎของแอมแปร์จะใช้ได้เฉพาะกรณีที่สถานะอยู่ตัว (steady state) คือ สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าไม่ขึ้นกับเวลา กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ นี้จะอธิบายเกี่ยวกับ สนามแม่เหล็ก B ที่เกิดจากกระแสการนำ I ตามกฎของแอมแปร์ และกระแสวิกฤตหรือกระแสการกระจัด I_d ที่เกิดขึ้นจากอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าซึ่งค้นพบโดยแมกเวลล์ กล่าวคือ อินทิกรัลเชิงเส้นรอบวิถีปิดของผลคูณแบบสเกลาร์ระหว่างสนามไฟฟ้า B กับการกระจัดน้อยยิ่ง dI จะมีความสัมพันธ์กับกระแสการนำและกระแสการกระจัด สำหรับการเกิดกระแสการกระจัดสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อมีการให้ประจุแก่ตัวเก็บประจุหรือการคายประจุของตัวเก็บประจุ จะพบว่ามีการเคลื่อนที่ของวงจรเข้าที่แผ่นตัวนำหนึ่งและออกจากแผ่นตัวนำอีกอันหนึ่งของตัวเก็บประจุ แต่จะไม่มีกระแสไฟฟ้างดงกล่าวนี้ผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า แมกซ์เวลล์จึงได้เสนอความคิดจะต้องมีกระแสไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งเกิดขึ้นภายในช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำที่มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าของวงจร มีทิศเดียวกันด้วย และสามารถผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำได้ โดยไม่ว่าช่องว่างดังกล่าวจะเป็นสุญญากาศหรือมีไดอิเล็กทริกคั่น แมกซ์เวลล์เรียกว่า กระแสการกระจัด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำ มีค่าตามสมการ (2.5)

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (2.5)$$

สมการของแมกซ์เวลล์ดังกล่าวจะใช้ได้สำหรับกรณีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอยู่ในสุญญากาศ แต่ถ้าตัวกลางเป็นสารอื่น ๆ จะต้องแทนค่า ϵ และ μ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาสมการของแมกซ์เวลล์จะพบว่ามีความไม่สอดคล้องที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดและความสอดคล้องที่คล้ายตามกัน ดังนี้

ความไม่สอดคล้องกันของสมการของแมกซ์เวลล์

1. กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้าตามสมการ (2.1) จะมีประจุอิสระในลักษณะของประจุบวกและประจุลบ แต่กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็กตามสมการ (2.5) จะไม่มีขั้วแม่เหล็กเพียงขั้วเดียวโดยอิสระ
2. กฎของฟาราเดย์ตามสมการ (2.3) ไม่มีพจน์แสดงความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าแต่กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ตามสมการ (2.4) มีพจน์แสดงความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าไม่มีประจุแม่เหล็กเสรี (free magnetic charge) ที่จะทำให้เกิดกระแสแม่เหล็ก

(magnetic current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ความไม่สอดคล้องที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดนี้ อาจจะเป็นข้อสังเกตที่มีความสำคัญมากกว่าการพิจารณาความสอดคล้องก็ได้

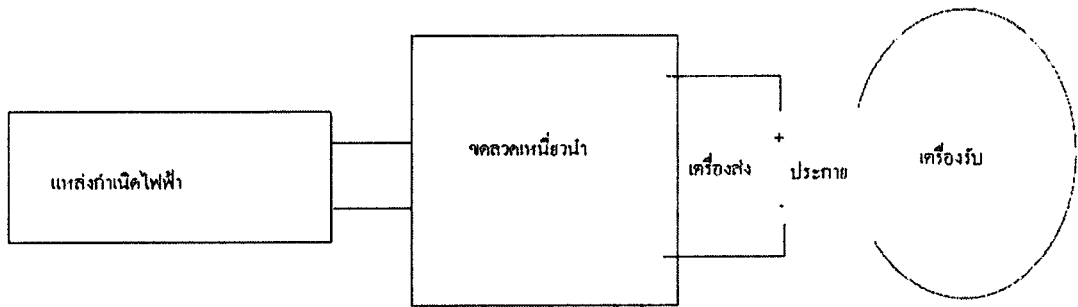
ความสอดคล้องกันของสมการของแมกซ์เวลล์

1. กฎของฟาราเดย์ตามสมการ (2.3) อธิบายเกี่ยวกับการเกิดสนามไฟฟ้าต่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก
2. กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ตามสมการ (2.4) อธิบายเกี่ยวกับการเกิดสนามแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้า

แสดงว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าไม่น่าจะปรากฏอยู่ตามลำพังแต่เพียงอย่างเดียวถ้ามีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้สนามไฟฟ้าที่มีอยู่เดิมเปลี่ยนไป และทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นใหม่เปลี่ยนแปลงไปอีก ซึ่งจะส่งผลต่อสนามไฟฟ้าอีกเป็นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ควบคู่กันไป การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้จะเป็นการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าแก่ตัวกลางโดยจะแผ่อยู่ในปริภูมิเสรีจากจุดเริ่มต้นในลักษณะของการกระตุ้นเช่นเดียวกับคลื่นน้ำที่แผ่ออกจากจุดเริ่มต้นที่มีการกระตุ้น แมกซ์เวลล์จึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

2.3 การทดลองของเฮิร์ตซ์และการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

หลังจากที่แมกซ์เวลล์ได้เสนอ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าและการเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดงกล่าว ต่อมาในปี ค.ศ. 1887 ไฮน์ริช รูคอล์ฟ เฮต (Heinrich Rudolf Hertz, ค.ศ. 1857-1894) เป็นนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ในการทดลองยืนยันความจริงที่สนับสนุนความคิดของแมกซ์เวลล์เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่ให้อินพุต (input) ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่ให้อ้าพุท (out put) ไปยังขั้วทรงกลม 2 ก้อน ที่มีประจุ+q และ -q ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง (transmitter) แลเครื่องรับ (receiver) มีลักษณะเป็นบ่วงและมีขั้วทรงกลม 2 ก้อน เช่นเดียวกับเครื่องส่ง โดยเครื่องรับและเครื่องส่งอยู่ห่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.1



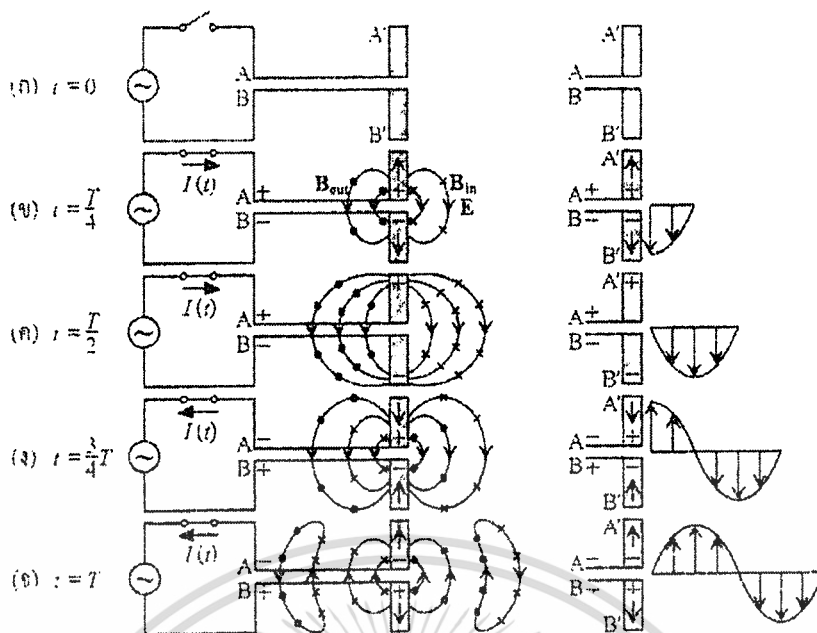
ภาพที่ 2.1 การทดลองของเฮิร์ตซ์

ที่มา : Serway & Beichner, 2000: 1077

เมื่อทำการเปิด-ปิดสวิตช์ที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าตลอดเวลา จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าขึ้นที่เครื่องส่งและมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ ต่ำ ๆ ตามจังหวะการเปิด-ปิดสวิตช์ดังกล่าว เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจะเกิดประกาย (Spark) ผ่านอากาศระหว่างขั้วทรงกลมทั้งสองก่อน โมเลกุลของอากาศจะแตกตัวเป็นไอออนและมีสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการคายประจุระหว่างขั้วทรงกลมทั้งสอง ทำให้เกิดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเครื่องส่งออกไปทิศทาง เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ถึงเครื่องรับจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าและประกายผ่านอากาศระหว่างขั้วทรงกลมทั้งสองก่อน โมเลกุลของอากาศจะแตกตัวเป็นไอออนและมีสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน จากผลการทดลองของเฮิร์ตซ์สรุปได้ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่เครื่องส่งและเกิดการคายประจุ จึงปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา
2. เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ถึงเครื่องรับจะเกิดประกาย แสดงว่ามีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น นั่นคือ บริเวณใดมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณนั้นต้องมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบได้กับการเกิดคลื่นน้ำที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิด โดยมีสายอากาศ (antenna) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำด้วยลวดตัวนำคู่หนึ่งต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (oscillator) ประจุบวกและประจุลบจะเคลื่อนที่ในลวดตัวนำสลับกันกลับไปกลับมา ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไป ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Cutnell & Johnson, 2001:734 และ Serway & Beichner, 2000:1090-1092

ภาพที่ 2.2(ก) เมื่อเวลา $t = 0$ ยังไม่มีประจุเคลื่อนที่ในลวดตัวนำ จึงไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น

ภาพที่ 2.2(ข) เมื่อเวลา $t = \frac{T}{4}$ ขั้ว A มีศักย์ไฟฟ้า + และขั้ว B มีศักย์ไฟฟ้า - ส่วนปลายลวดตัวนำ A' และ B' มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้ประจุ + เคลื่อนที่จาก A ไป A' และประจุ - เคลื่อนที่จาก B ไป B' ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B ที่เกิดขึ้น \uparrow

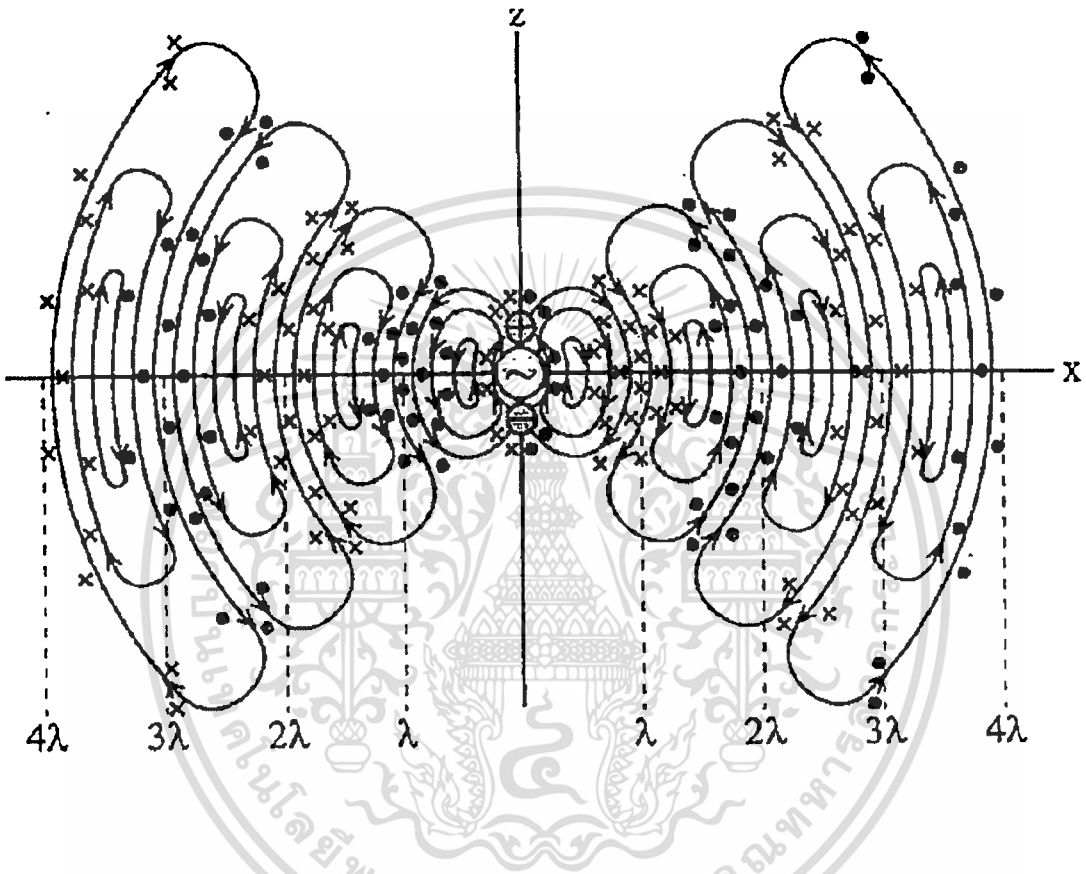
ภาพที่ 2.2(ค) เมื่อเวลา $t = \frac{T}{2}$ ประจุ + เคลื่อนที่ถึงปลายลวดตัวนำ A' และประจุ - เคลื่อนที่ถึงปลายลวดตัวนำ B' ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B แฉ่ออกไปเป็นวงใหญ่ขึ้น

ภาพที่ 2.2(ง) เมื่อเวลา $t = \frac{3}{4}T$ ขณะที่ประจุ + และประจุ - อยู่ที่ปลายลวดตัวนำจะเกิดการสลับขั้ว โดยขั้ว A มีศักย์ไฟฟ้า - และขั้ว B มีศักย์ไฟฟ้า + ทำให้ประจุ + เคลื่อนที่จาก A ไป A' และประจุ - เคลื่อนที่จาก B ไป B' ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B แฉ่ออกเป็นวงใหญ่มากขึ้น ขณะเดียวกันก็จะเกิดสนามไฟฟ้าวงเล็กขึ้นอีกแต่สนามแม่เหล็กจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศเดิม

ภาพที่ 2.2(จ) เมื่อเวลา $t = T$ เนื่องจากขั้ว A ยังมีศักย์ไฟฟ้า - และขั้ว B ยังมีศักย์ไฟฟ้า + จึงทำให้ประจุ - เคลื่อนที่จาก A ไป A' และประจุ - เคลื่อนที่จาก B ไป B' ทำให้เส้นแรงสนามไฟฟ้าตัดกันเป็นวงปิดแฉ่ออกไป และในขณะเดียวกันก็จะเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้นใหม่อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในลวดตัวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยเส้นแรงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะต่อกันเป็นวงปิด และมีระยะห่างจากกันเสมอ ดังนั้น ถ้าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ ก็จะได้เส้นแรงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นวงปิดแผ่ออกไปอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเกิดแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Young & Freedman, 2000: 1047

2.4 โมเมนตัมและความดันรังสี

การศึกษาเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านมา เป็นการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกไปในสุญญากาศ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา โดยที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะนำพาพลังงานเพื่อใช้ในการเสริมสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปตกกระทบผิวของสารหรือวัตถุก็จะมี ความดันรังสี (radiation pressure, P_{rad}) ที่ผิวของสารหรือวัตถุ ซึ่งจะมีผลต่อภาวะการเคลื่อนที่ของสารหรือวัตถุนั้น แสดงว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบจะถ่ายโอน โมเมนตัม (momentum, p) ให้กับสารหรือวัตถุ กล่าวคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะนำพาโมเมนตัมเช่นเดียวกับพลังงาน โดยโมเมนตัมและความดันรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแยกออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปในสุญญากาศด้วยอัตราเร็ว c มีเวกเตอร์พอยดิง s นำพาโมเมนตัม p และพลังงานรวม U ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว A ในเวลา t แมกซ์เวลล์กล่าวว่า ถ้าพื้นผิวดูดกลืนพลังงานรวม ที่ตกกระทบทั้งหมดในเวลาเดียวกันนี้ ขนาดโมเมนตัมทั้งหมดที่นำพาถึงพื้นผิวมีค่าตามสมการ (2.6)

$$p = \frac{U}{c} \quad (2.6)$$

กรณีดังกล่าวนี้เป็นวัตถุดำ (black body) ที่มีการดูดกลืนรังสีตกกระทบอย่างสมบูรณ์โดยไม่มีรังสีสะท้อนจากวัตถุเลย สมการ (2.6) เป็นการดูดกลืนสมบูรณ์ (complete absorption)

ความดัน P_{rad} ที่กระทำบนพื้นผิวมีนิยามคือแรงต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (F/A) และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.7)

$$P_{rad} = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} \quad (2.7)$$

แทนค่าโมเมนตัม p จากสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.7)

$$P_{rad} = \frac{1}{A} \frac{d}{dt} \left[\frac{U}{c} \right] = \frac{1}{c} \frac{dU}{dt} \quad (2.8)$$

สมการ (2.8) อัตราการถ่ายโอนพลังงาน (dU/dt) ต่อพื้นที่ A คือขนาดของเวกเตอร์พอยดิง S นั่นคือ ความดันรังสีที่กระทำบนพื้นผิวการดูดกลืนสมบูรณ์มีค่าตามสมการ (2.9)

$$P_{rad} = \frac{S}{c} = \frac{1}{c} \frac{EB}{\mu_0 c} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.9) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ในกรณีที่ความดันสูง ขณะที่สมการ (2.6) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ในกรณีที่โมเมนตัมเชิงเส้นต่ำ

2. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวที่มีการสะท้อนสมบูรณ์ (complete reflection) ดังเช่นกระจก โมเมนตัมที่นำพาถึงพื้นผิวในเวลา t จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ โมเมนตัมเนื่องจากการตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวและโมเมนตัมที่ผลจากการสะท้อน โดยโมเมนตัมทั้งสองส่วนนี้จะมีขนาดเท่ากันแต่ทิศตรงข้ามกัน ดังนั้น ขนาดโมเมนตัมที่เปลี่ยน p ตลอดจนค่าความดันรังสี P_{rad} จะเป็น 2 เท่าของการดูดกลืนสมบูรณ์ ดังนี้

$$p = \frac{2U}{c} \quad (2.10)$$

และ

$$P_{rad} = \frac{2S}{c} \quad (2.11)$$

ในทางปฏิบัติ ไม่มีการดูดกลืนสมบูรณ์และไม่มีการสะท้อนสมบูรณ์ ซึ่งจะพบว่าความดันรังสีมีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{S}{c}$ และ $\frac{2S}{c}$ หรือ $\frac{S}{c} < p_{rad} < \frac{2S}{c}$

นอกจากนี้ ยังสามารถพิจารณาค่าเฉลี่ยของการถ่ายโอนขนาดโมเมนตัมต่อเวลาต่อพื้นที่ตั้งฉากจากสมการ (2.7) ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบพื้นผิว ซึ่งก็คือค่าความดันรังสีนั่นเอง ดังนั้น จึงสามารถพิจารณาขนาดของเวกเตอร์พอยน์ติง S ด้วยค่าเฉลี่ยของขนาดเวกเตอร์พอยน์ติง S_{av} ซึ่งก็คือความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า I และนอกจากสมการ (2.9) และ (2.11) เขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

การดูดกลืนสมบูรณ์

$$p_{red} = \frac{S_{av}}{c} = \frac{1}{c} \quad (2.12)$$

การสะท้อนสมบูรณ์

$$p_{red} = \frac{2S_{av}}{c} = \frac{2I}{c} \quad (2.13)$$

2.5 การแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสาร

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ในสุญญากาศจะมีอัตราเร็ว (c) ประมาณ 3×10^8 ต่อวินาทีถ้าเป็นการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสาร เช่น อากาศ น้ำ หรือ แก้ว ย่อมมีอัตราเร็วแตกต่างไปจากอัตราเร็วในสุญญากาศดังกล่าว ในที่นี้พิจารณาการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสารที่เป็นฉนวนหรือไดอิเล็กทริก โดยอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสาร (v) จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณต่างๆ ที่เป็นสมบัติของสสาร เช่น สภาพย่อย (ϵ) สภาพความซึมซาบ (μ) ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (k) และดรรชนีหักเห (n) ตลอดจนความสัมพันธ์กับอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ จะได้อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสารตามสมการ (2.14)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.14)$$

จาก $\mu = \mu_r \mu_0$ และ $\epsilon = k\epsilon_0$ แทนค่าลงในสมการ (2.14)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{k\epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu_r k}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r k}} \quad (2.15)$$

สภาพความซึมซาบได้สัมพันธ์ μ_r ของไดอิเล็กทริกมีค่าเข้าใกล้ 1 (ยกเว้นสารเฟอร์โรแมกเนติก) เมื่อ $\mu_r \approx 1$ จากสมการ (2.15) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ตามสมการ (2.16)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0}} \frac{1}{\sqrt{k\epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{k}} = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2.16)$$

ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก k มีค่ามากกว่า 1 เสมอ ดังนั้น อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในไดอิเล็กทริก v จะต้องมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็ว c ในสุญญากาศ โดยมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{k}}$ เท่าของอัตราเร็ว c ในสุญญากาศกับอัตราเร็ว v ในสสารและเมื่อ $\mu_r \approx 1$ จะได้ว่า

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_r k} \approx \sqrt{k} \quad (2.17)$$

นอกจากนี้ อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสารยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่นพลังงาน (u) เวกเตอร์พอยน์ติง (S) และความเข้ม (I) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และได้ความหนาแน่นพลังงานตามสมการ (2.18)

$$u = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{B^2}{2\mu} = \epsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu} \quad (2.18)$$

จากสมการ จะได้เวกเตอร์พอยน์ติงตามสมการ (2.19)

$$S \equiv \frac{1}{\mu} E \times B \quad (2.19)$$

ขนาดของเวกเตอร์พอยน์ติงตามสมการ (2.20)

$$S \equiv \frac{EB}{\mu} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^2 = \frac{1}{\mu v} E^2 = \frac{v B^2}{\mu} \quad (2.20)$$

ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมการ (2.21)

$$I = S_{av} \equiv \frac{E_{max} B_{av}}{2\mu} = \frac{1}{2\mu v} E_{max}^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_{max}^2 = \frac{1}{2} \epsilon v E_{max}^2 \quad (2.21)$$

การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสสารดังกล่าวนี้ เป็นการแผ่ฉนวนหรือไดอิเล็กทริกขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่ค่อยแผ่ในตัวนำ เพราะว่ามันนำไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะนำกระแส ซึ่งมีกลไก (mechanism) ที่ทำให้พลังงานของคลื่นต้องกระจาย (dissipating) และสะท้อนออกไป สำหรับตัวนำอุดมคติ (ideal conductor) จะมีค่าสภาพต้านทานเป็นศูนย์และสนามไฟฟ้าภายในศูนย์ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบจะสะท้อนกลับหมด ส่วนตัวนำจริง (real conductor) ต่าง ๆ จะมีสภาพต้านทานด้วย ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแผ่ผ่านเข้าไปในตัวได้บ้าง และมีบางส่วนสะท้อนออกมาด้วยเช่นกัน แต่ถ้าเป็นโลหะที่มีผิวขรุขระเป็นเงา เช่น เงินหรืออะลูมิเนียม จะเป็นตัวสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีมากและเป็นตัวสำคัญที่จะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (standing electromagnetic wave)

2.6 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (spectrum of electromagnetic wave) เป็นปรากฏการณ์ที่ได้จากการแยกรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นความถี่ต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่รวมอยู่ในรังสีนั้น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วคลื่น (v) ในตัวกลางความถี่ (f) และความยาวคลื่น (λ) เหมือนกับคลื่นชนิดอื่น ๆ คือ $v = f\lambda$ โดยที่ความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นยาวหรือที่ความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นสั้น อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของความยาวคลื่นหรือความยาวถี่ก็ยังมี ความเหลื่อมล้ำกันอยู่มาก

คลื่นวิทยุ (radio waves) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการส่งและรับคลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ รวมทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เช่น คลื่นที่เกิดขึ้นขณะที่ฟ้าผ่ามีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 กิโลเมตร ถึง 0.3 เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 1 เฮิรตซ์ ถึง 10^9 เฮิรตซ์ คลื่นวิทยุสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปจะใช้วงจรการแกว่งกวัด (oscillating circuits)

คลื่นจุลภาค (microwaves) เป็นคลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องเรดาร์ (radar) ซึ่งเป็นคำย่อของ radio detection and ranging แปลว่า การตรวจและหาระยะด้วยวิทยุ เพื่อใช้หาตำแหน่งหรือนำวิถีให้วัตถุที่เคลื่อนที่ต่างๆ เช่น เรือเดินทะเล อากาศยาน จรวด หรือดาวเทียม และใช้ในระบบโทรคมนาคม ตลอดจนการวิเคราะห์โครงสร้างอะตอมและโมเลกุล มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3 เมตร ถึง 10^{-3} เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 10^9 เฮิรตซ์ ถึง 3×10^{11} เฮิรตซ์ เครื่องเรดาร์มีส่วนประกอบของระบบที่สำคัญคือ เครื่องกำเนิดรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นเป็นเซนติเมตร โดยอินพุทของระบบจะถูกการกล้ำ (modulation) ให้เป็นจังหวะหรือพัลส์ (pulse) ในความถี่วิทยุและจ่ายให้กับสายอากาศที่หมุนปรับได้ เพื่อส่งรังสีออกไปเป็นลำ เมื่อคลื่นจุลภาคตกกระทบวัตถุที่อยู่ไกลตามแนวทางของลำรังสีก็จะสะท้อนกลับมายังเครื่องส่งซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องรับด้วย โดยระบบการรับจะมีหลอดรังสีแคโทดเป็นจอแสดงให้เห็นสัญญาณที่รับได้หลังจากคลื่นเดินทางไปถึงวัตถุแล้วกลับมา จึงสามารถวัดและคำนวณเวลาได้ถูกต้อง

นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาไปจนถึงการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยควบคุมในการนำทิศทางและการเดินทางแบบอัตโนมัติ โดยไม่จำเป็นต้องมีจอภาพอีกด้วย

อินฟราเรด (infrared) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกจากโมเลกุลของวัตถุร้อน มีกำลังทะลุทะลวงหมอกหรือควันและกระจายแสงที่ตามองเห็นได้ ตามนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีได้แต่สัตว์บางชนิดที่หากินกลางคืน เช่น งู จะมีอวัยวะสำหรับรับรังสีได้แดงได้ เพื่อประโยชน์ในการหากินตอนกลางคืน ด้วยเหตุนี้ ภาวถ่ายด้วยฟิล์มที่ไวต่อแสงธรรมดามีความยาวคลื่นตั้งแต่ค่า

เอกสารนี้ ไม่วารณิใดาทังสิ้น อีกทังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10^{-3} เมตร ถึง 9.8×10^{-7} เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 3×10^{11} เฮิรตซ์ ถึง 4×10^{14} เฮิรตซ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงย่อย ๆ ดังนี้

ได้แดงไกล (far infrared) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-3} เมตร ถึง 3×10^{-5} เมตร

ได้แดงกลาง (middle infrared) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 3×10^{-5} เมตร ถึง 3×10^{-6} เมตร

ได้แดงใกล้ (near infrared) มีความยาวคลื่นลดลงไปจนถึง 9.8×10^{-7} เมตร

อย่างไรก็ตามรังสีได้แดงสามารถเปลี่ยนให้เป็นแสงที่ตามนุษย์ธรรมดาสามารถมองเห็นได้โดยใช้เครื่องเปลี่ยนรังสีได้แดง (infrared converter)

แสงที่มองเห็น (visible light) เป็นแสงสีต่าง ๆ ที่ตามองเห็นได้ในสเปกตรัมต่อเนื่องของแสงสว่างสีขาวที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์ในอะตอมหรือโมเลกุลเปลี่ยนสถานะพลังงาน ซึ่งมีความยาวคลื่นแคบมากอยู่ระหว่าง 7.8×10^{-7} เฮิรตซ์ โดยความรู้สึกลึกทางประสาทที่ตามองเห็นแสงสีต่าง ๆ เนื่องจากความถี่หรือความยาวคลื่นต่างๆ กัน สำหรับความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้มีค่าต่างๆ ดังแสดงในตาราง 2.1

แสง	ความยาวคลื่น (mm)
ม่วง	400 - 440
น้ำเงิน	440 - 480
เขียว	480 - 560
เหลือง	560 - 590
ส้ม	590 - 630
แดง	630 - 700

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็น

ที่มา : Young & Freedman, 2000: 1045.

เหนือม่วง (ultraviolet) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีมากในแสงอาทิตย์ และเกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ สามารถทำเทียมได้โดยการใช้หลอดไฟฟ้าบรรจุไอปรอทที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 3.8×10^{-7} เมตร ถึง 6×10^{-10} เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 8×10^{14} เฮิรตซ์ ถึง 3×10^{17}

เฮิรตซ์ เมื่อรังสีเหนือม่วงจากดวงอาทิตย์ส่งผ่านบรรยากาศของโลกในชั้นโอโซน (ozone layer) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) จะทำให้อะตอมของแก๊สแตกตัวเป็นไอออนจำนวนมาก ซึ่งมีประโยชน์ในการสะท้อนคลื่นวิทยุระหว่างประเทศให้อ้อมส่วน โคงของผิว โลกได้แต่ก็ยังเป็นอุปสรรคสำคัญในการสะท้อนรังสีที่มาจากนอกโลก

นอกจากนี้รังสี เหงื่อม่วงยังทำปฏิกิริยากับสารสีขาว (ergosterol) ที่มีปริมาณเล็กน้อยในไขมันสัตว์ให้เปลี่ยนเป็นวิตามิน D₂ (calciferol) ซึ่งเป็นตัวควบคุมการสะสมของสารประกอบแคลเซียมในร่างกาย ถ้าขาดก็จะเป็นโรคกระดูกอ่อน รังสีเหงื่อม่วงยังทำให้อ่อนของสิ่งมีชีวิตแตกออก จึงเป็นประโยชน์ในการฆ่าจุลินทรีย์และใช้ในทางการแพทย์ สำหรับกล้องจุลทรรศน์เหงื่อม่วง (ultraviolet microscope) จะมีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงธรรมดา เนื่องจากรังสีแสงเหงื่อม่วงให้กับวัตถุได้โดยใช้เลนส์ที่ทำด้วยแก้วควอตซ์

รังสีเอ็กซ์ (x-rays) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในอะตอมเปลี่ยนสถานะพลังงานจากวงโคจรนอกไปวงโคจรใน พร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์เรียกว่า แครกเทอริสติกเอ็กซ์เรย์ (characteristic x-rays) หรือเกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียส ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากเดิม พลังงานของอิเล็กตรอนจะลดลงพร้อมทั้งปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์เรียกว่า เบรมสตราลุง (Bremstralung) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10⁻⁹ เมตร ถึง 6 x 10⁻¹² เมตร หรือมีความถี่ตั้งแต่ 3 x 10¹⁷ เฮิรตซ์ ถึง 5 x 10¹⁹ เฮิรตซ์ รังสีเอ็กซ์สามารถทำปฏิกิริยากับฟิล์มถ่ายรูปได้เช่นเดียวกับแสงธรรมดา และสารต่างๆ จะสามารถดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของสารนั้น ๆ โดยสารที่มีน้ำหนักอะตอมและความหนาแน่นเพียงใด ก็จะยิ่งโปร่งต่อรังสีเอ็กซ์มากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถถ่ายภาพกระดูกเนื้อเยื่อในร่างกายของมนุษย์ได้ด้วยรังสีเอ็กซ์ และการอุตสาหกรรมสามารถใช้สำหรับตรวจสอบสิ่งทึบแสงและชิ้นส่วนของเครื่องจักรได้

นอกจากนี้ รังสีเอ็กซ์ยังมีผลต่ออะตอมที่รับและสามารถทำลายเนื้อร้ายได้อีกด้วยซึ่งใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง แต่ก็สามารถทำลายชิ้นเนื้อดีได้ด้วยเช่นกัน

รังสีแกรมมา (gamma rays) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสี มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10⁻¹⁰ เมตร ถึง 10⁻¹⁴ เมตร หรือมีความถี่ตั้งแต่ 3 x 10¹⁸ เฮิรตซ์ ถึง 3 x 10²² เฮิรตซ์ รังสีแกรมมามีสมบัติในการทะลุทะลวงสูง ซึ่งในปัจจุบันสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการฉายรังสีแกรมมาเพื่อทำลายจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แต่จะต้องระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากดูดกลืนแล้วจะเกิดผลรุนแรงและอันตรายมาก

2.7 การสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

มนุษย์มีการติดต่อสื่อสารเพื่อส่งสัญญาณระหว่างผู้ส่งกับผู้รับให้เข้าใจกันมาตั้งแต่สมัยโบราณ เช่น การใช้แสงไฟในเวลากลางคืน การใช้แสงแดดสะท้อนกระจกเงาในเวลากลางวัน ตลอดจนการใช้สัญญาณจากควันก็ต่ออาศัยแสงสว่างช่วย ในยุคต่อมาการติดต่อสื่อสารสามารถส่งและรับเป็นรหัส สัญญาณ เสียง และภาพ โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

การส่งวิทยุโทรเลข (radiogram เป็นการส่งสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้รหัสมอร์ส(Morse code) ซึ่งแซมมวล ฟินเลย์ บรีซมอร์ส (Sammuel Finley Breeze Morse, ค.ศ. 1797-1872) ชาวอเมริกันแต่มาประสบความสำเร็จที่อังกฤษ ประดิษฐ์เครื่องรับส่งโทรเลข (telegram) วงจรปีดมอร์สเริ่มทดลองส่งข่าวสารทางไกลโดยใช้กระแสไฟฟ้าเป็นสื่อในปี ค.ศ. 1832 และมาสำเร็จในปี ค.ศ. 1844 รวมเวลาแห่งความพยายาม 12 ปี ต่อมา มาร์เชเซ กูเกลลิโม มาร์โคนี (Marchese Guglielmo Marconi, ค.ศ. 1874-1937) ชาวอิตาลี ทำการประดิษฐ์เครื่องรับส่งวิทยุโทรเลขโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่คลื่นวิทยุเป็นคลื่นพาหะ (carrier wave) พาสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ เครื่องส่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับคลื่นวิทยุทำหน้าที่ก่อกำ (modulate) คลื่นพาหะให้มีลักษณะยาวหรือสั้น แล้วส่งออกไปตามสายอากาศของเครื่องส่ง เมื่อเคลื่อนที่ถึงสายอากาศของเครื่องรับ ก็แยกเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการด้วยวงจรเรโซแนนซ์ (resonance circuit) ส่วนมากสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับจะมีกำลังอ่อน ต้องใช้เป็นเครื่องโทรพิมพ์ (teletype) สามารถพิมพ์ออกมาเป็นข้อความอ่านได้เลย

การส่งวิทยุ (radio) เป็นการส่งสัญญาณโดยการใส่คลื่นเสียงลงไปบนคลื่นพาหะ มี 2 วิธี ดังนี้

1. การก่อกำแอมพลิจูด (amplitude modulation, AM) เป็นการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของคลื่นพาหะให้สอดคล้องกับความถี่ของคลื่นเสียงที่เป็นสัญญาณ โดยจะมีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นวิทยุมีค่าคงตัวทั้งก่อนและหลังการก่อกำ
2. การก่อกำความถี่ (frequency modulation, FM) เป็นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาหะเพียงเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยแอมพลิจูดของคลื่นวิทยุไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อคลื่นวิทยุส่งออกจากเสาอากาศของเครื่องส่งไปถึงเสาอากาศของเครื่องรับ ก็จะแยกเอาสัญญาณที่ต้องการออกเรียกว่า ถอดการก่อกำ (demodulation) สำหรับความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุมีค่าต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.2

คลื่นวิทยุ	ความถี่	ความยาวคลื่น
VLF (very low)	3 - 30 kHz	100 - 10 km
LF (low)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
MF (medium)	300 - 3000 kHz	1000 - 100 m
HF (high)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
VHF (very high)	30 - 300 MHz	10 - 1 m
UHF (ultrahigh)	300 - 3000 MHz	100 - 10 cm
SHF (super high)	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
EHF (extremely high)	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

ตารางที่ 2.2 ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ

ที่มา: Adums & Allday, 2000: 574

การส่งวิทยุโทรทัศน์ (television) เป็นการส่งสัญญาณเสียงและภาพโดยการใส่ลงไปในคลื่นพาหะ ซึ่งจะมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ภาค ที่ใช้ความถี่ต่างกันไม่มากนักได้แก่ ภาคเสียงใช้ระบบเอฟเอ็ม และภาคภาพใช้ระบบเอเอ็ม ปัจจุบัน การส่งคลื่นวิทยุโทรทัศน์จากสถานีส่งจะใช้คลื่นจุลภาคเป็นคลื่นพาหะส่งขึ้นไปยังดาวเทียมแล้วจึงส่งย้อนมายังสถานีรับ

นอกจากนี้ ยังมีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้สะท้อนจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์การใช้สถานีย่อย ๆ ถ่ายทอดเป็นระยะ ๆ และการส่งผ่านสายเคเบิลเส้นใยนำแสง (optical fibre)

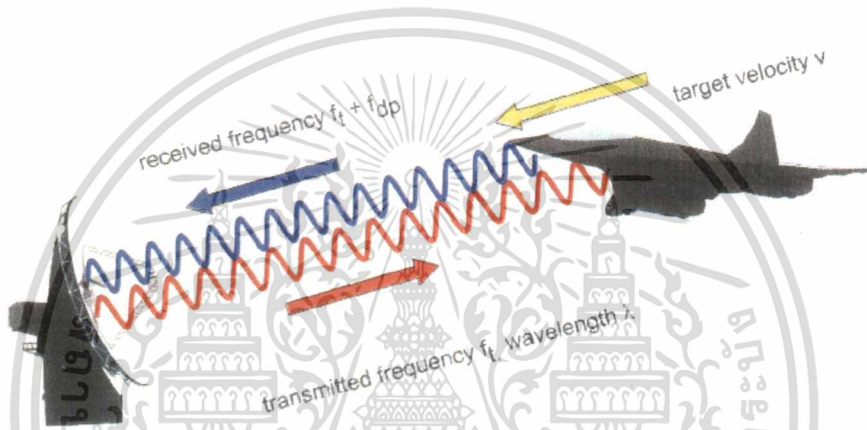
จะเห็นได้ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีประโยชน์มากในการติดต่อสื่อสาร โดยความถี่ที่ใช้มีหลายช่วง ตั้งแต่ความถี่ต่ำคือคลื่นวิทยุส่งสัญญาณเสียง และคลื่นจุลภาคส่งคลื่นวิทยุโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม ในอนาคตจะใช้แสงเลเซอร์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถกล่าวได้หลายช่องสัญญาณพร้อม ๆ กัน เมื่อเทียบกับคลื่นความถี่อื่น ๆ

2.8 ชนิดของเรดาร์

2.8.1 คลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave ; CW)

เรดาร์แบบ CW ก็คือการส่งสัญญาณความถี่อย่างต่อเนื่องและมีการสะท้อนกลับมาจากวัตถุเป้าหมายที่กระทบโดยสัญญาณความถี่ที่สะท้อนกลับมานี้จะเหมือนกับสัญญาณที่ส่งไป

อย่างไรก็ตาม สัญญาณความถี่ที่กลับมาจะขึ้นอยู่กับความเร็วและทิศทางของวัตถุนั้น สิ่งเหล่านี้จะมีผลกระทบก็คือการลดทอนของสัญญาณ ในทางเดียวกัน เมื่อวัตถุเป้าหมายที่ถูกกระทบโดยคลื่นเรดาร์ CW สัญญาณความถี่ที่ย้อนกลับมาจะสูงกว่าความถี่ที่ส่งไป ความถี่สะท้อนจะต่ำกว่าวัตถุเป้าหมายเคลื่อนที่ออกไป



ภาพที่ 2.4 เครื่องบินเคลื่อนที่ตรงไปหาเรดาร์ที่แบบ CW

ที่มา : Peter Devine , Radar Level Measurement the user guide, 2000: 33

สัญญาณความถี่ที่รับได้ก็จะสูงกว่าสัญญาณที่ส่งไปและสัญลักษณ์ของ $R = \frac{T \times c}{2} f_{db}$ ก็จะเป็นบวก (+) แต่ถ้าเครื่องบินเคลื่อนที่ห่างออกไปจากเรดาร์ที่ความเร็วเท่ากัน สัญญาณความถี่จะเป็น $f_t - f_{db}$

ความเร็วของวัตถุเป้าหมายในทิศทางของเรดาร์จะคำนวณจาก

$$V = \frac{\lambda \times f_{dp}}{2} = \frac{C \times f_{dp}}{2 \times f_t} \quad (2.22)$$

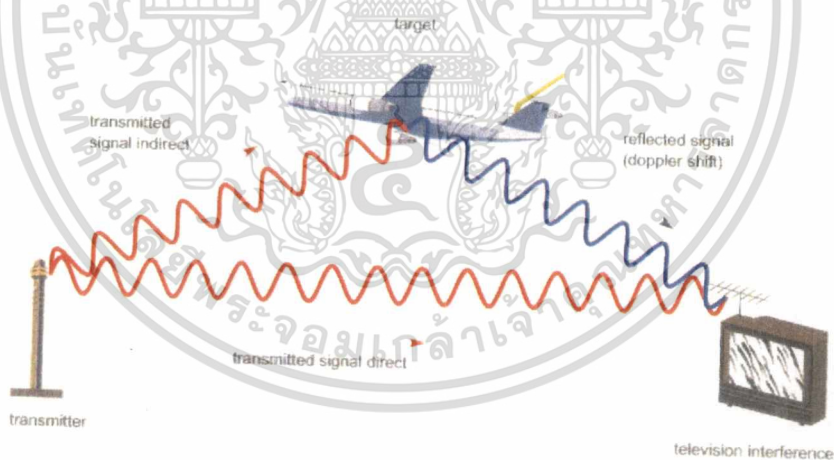
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ C : ความเร็วของคลื่นไมโครเวฟ
 V : เป้าหมายของความเร็ว
 f_t : ความถี่ในการส่งสัญญาณ
 f_{dp} : ความถี่ในการส่งสัญญาณซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็ว
 $f_t - f_{dp}$: ความถี่ที่ได้รับ

2.8.2 แบบรวมความถี่กับคลื่นแบบต่อเนื่อง (Frequency Modulate – Continuous Wave ; FM – CW)

เรดาร์แบบ CW ความถี่เดียวไม่สามารถใช้วัดระยะความห่างได้เพราะว่าจะไม่มีเวลาอ้างอิง เมื่อมีการหน่วงเวลาจากการสะท้อนกลับจากเป้าหมาย เวลาอ้างอิงนี้สามารถที่จะทำให้ความถี่รู้ถึงลักษณะได้ดี ถ้าพิจารณาความถี่ของสัญญาณที่ส่งไปจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นนั้น ความแตกต่างจากสัญญาณที่ส่งไปกับสัญญาณที่รับกลับมานั้นจะเป็นสัดส่วนซึ่งกัน ขึ้นอยู่กับระยะทางของเป้าหมาย

ถ้าระยะห่างของเป้าหมายคือ R และ C คือความเร็วแสง ดังนั้นเวลาที่จะใช้การเดินทางกลับก็คือ $At = 2$



ภาพที่ 2.5 หลักการของ เรดาร์แบบ FW-CW

ที่มา : Peter Devine ,Radar Level Measurement the user guide, 2000: 35

เราจะเห็นจากรูป 2.5 ถ้าเรารู้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณส่งที่เป็นเชิงเส้นแล้ววัดความแตกต่างระหว่างความถี่ที่ส่งกลับรับ = fd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาเวลาที่แตกต่างได้ และระยะ = mdR ได้เช่นกัน ในทางปฏิบัติ, สัญญาณ FM – CW ก็คือ ความแตกต่างของสัญญาณ 2 ตัว

2.8.3 พัลส์เรดาร์ (Pulse Radar)

พื้นฐานของเรดาร์แบบ Pulse พัลส์เรดาร์จะใช้วัฏระยะที่มีความห่างมากๆ ตั้งแต่เริ่มมีเทคโนโลยีเรดาร์แรกๆ รูปแบบพื้นฐานของพัลส์เรดาร์ก็คือการวัดเวลาที่เคลื่อนที่คลื่นสั้นก็คือเป็นมิลลิวินาทีจะถูกส่งและวัดเวลาที่ส่งกลับจากเป้าหมาย

พัลส์ของเรดาร์แบบพัลส์จะได้เป็นพัลส์แบบลูกเดียวแต่จะเป็นกลุ่มคลื่นสั้น จำนวนและขนาดของคลื่นจะขึ้นอยู่กับความห่างของพัลส์และความถี่พาหะที่ใช้ ระหว่างคาบเวลาของพัลส์แต่ละลูกจะเท่ากับ t ซึ่งก็จะแปลงกลับเป็นความถี่ f_r หรือ PRF ส่วนความกว้างของพัลส์ก็จะแทน

ถ้าระหว่างคาบเวลา t เท่ากับ 500 msec ดังนั้นความถี่ f_r ก็จะเท่ากับ 2000 พัลส์ / วินาที ใน 500 มิลลิวินาที เรดาร์จะเดินทางไปได้ 150 กม. เมื่อพิจารณาการสะท้อนกลับของสัญญาณที่กระทบวัตถุเป้าหมายก็ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 75 กม. ถ้าเวลาที่ใช้ไปในการสะท้อนกลับเท่ากับ T และ C คือค่าความเร็วแสง ดังนั้นระยะทางแสดงได้ดังสมการ

$$R = \frac{T \times c}{2}$$

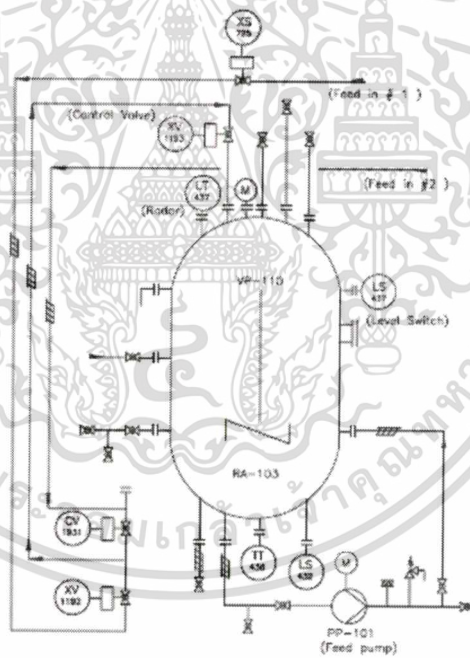
(2.23)

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความถูกต้อง สำหรับระบบการวัดระดับในกรณีศึกษา

3.1 บทนำ

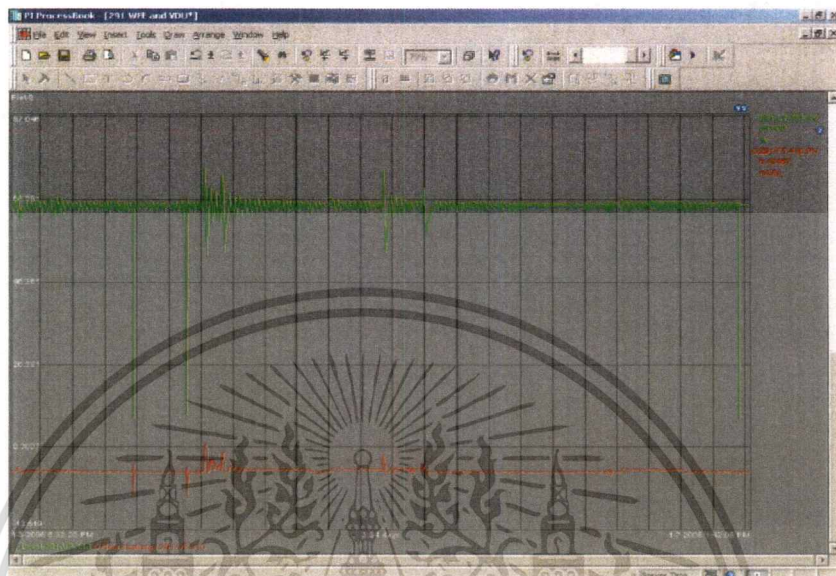
จากกรณีศึกษา กระบวนการผลิตทำการควบคุมระดับสารแลคติกส์ไว้ที่ 60% ของถัง เมื่อสารแลคติกส์ ถูกป้อนเข้าถังผ่านวาล์วควบคุม XV-1193 ดังภาพที่ 3.1 ระบบทำการวัดและควบคุมระดับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับชนิดเรดาห์ โดยระบบถูกออกแบบให้มี Level Switch เป็นอุปกรณ์ป้องกันในกรณีที่สารเคมีล้นถัง



ภาพที่ 3.1 แสดงกระบวนการผลิตทำการควบคุมระดับสารแลคติกส์ในกรณีศึกษา

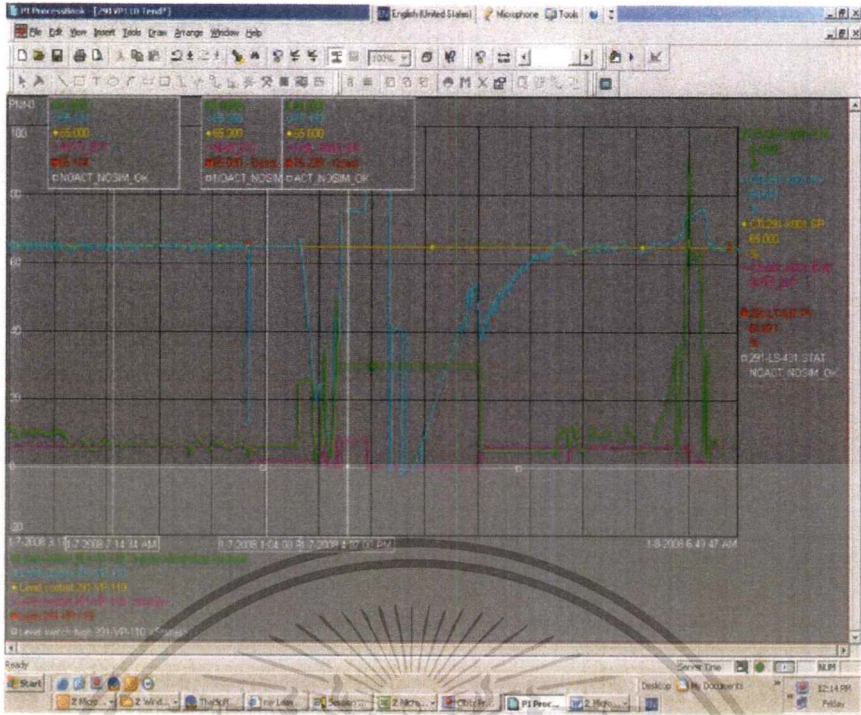
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหลังจากการใช้งานผ่านไป ระยะเวลาหนึ่ง พบว่า เกิดการแกว่งของสัญญาณของเรดาห์ ดังแสดงด้วยเส้นกราฟสีเขียว ครั้งแรกในวันที่ 3 มกราคม ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และกลับเข้าสู่ระดับที่ควบคุมได้อีกครั้ง



ภาพที่ 3.2 การแกว่งของสัญญาณ เรดาห์อ่านค่าเพี้ยนไป

ต่อมาในวันที่ 7 มกราคม DCS ได้รับสัญญาณ แจ้งเตือนระดับของของเหลวเกินพิกัดแสดงดังภาพที่ 3.3 เมื่อสัญญาณควบคุมกระบวนการแทนด้วย เส้นสีฟ้า และตำแหน่งค่าเป้าหมายแทนด้วยเส้นสีเหลือง หลังจากช่างซ่อมบำรุงเข้าไป ทำการ ตรวจสอบแก้ไขหน้างานพบว่า Level Switchไม่ทำงานเนื่องมาจากระดับของของเหลวที่เกิดขึ้นจริงไม่เกินพิกัด อย่างที่เรดาห์ส่งสัญญาณออกมา

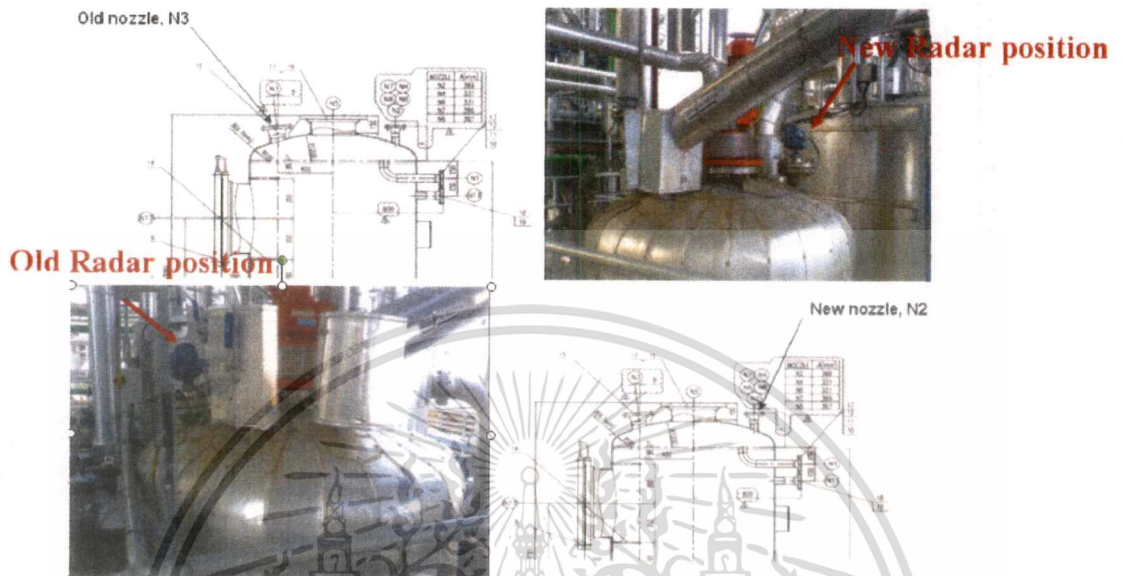


ภาพที่ 3.3 การแกว่งของสัญญาณ เรดาร์อ่านค่าเพี้ยนไป

ในเบื้องต้นช่างซ่อมบำรุงทำการแก้ไข โดยการตรวจสอบกระบวนการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และป้อนค่าพารามิเตอร์ใหม่ ให้ เรดาร์ดังกล่าว ซึ่งก็ไม่เป็นผลต่อเมื่อทำการพิสูจน์เรดาร์ดังกล่าวกับจุดวัด ในบริเวณอื่นพบว่าเรดาร์สามารถทำงานได้ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท้ายที่สุดได้ทำการย้ายตำแหน่งในการติดตั้งเรดาร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ผลปรากฏว่าเรดาร์สามารถอ่านระดับได้ถูกต้องตรงกับระดับของของเหลวที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เมื่อสัญญาณควบคุมกระบวนการแทนด้วย เส้นสีฟ้า และตำแหน่งค่าเป้าหมายแทนด้วยเส้นสีเหลือง



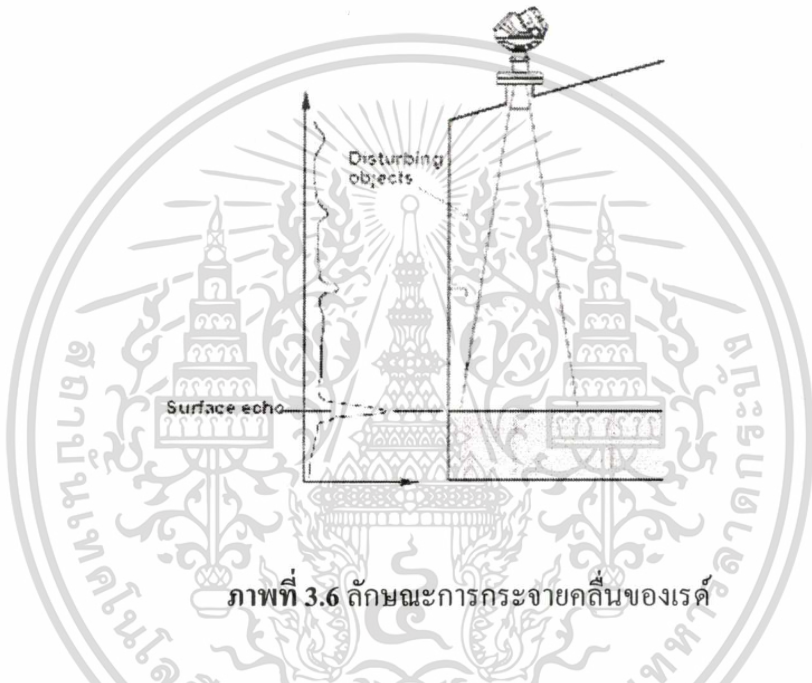
ภาพที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งเรดาร์จาก N2 ไปอยู่ที่ตำแหน่ง N3 แทน



ภาพที่ 3.5 สัญญาณควบคุมที่อ่านได้หลังจากการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่เรดาห์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีมาตลอดระยะเวลาว่าหนึ่งปี โดยที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระบวนการผลิต ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้ง เรดาห์ สามารถอ่านระดับได้อย่างถูกต้อง จากเหตุการณ์ดังกล่าว คาดว่าการอ่านค่าที่ผิดเพี้ยนไปของเรดาห์ เป็นผลสืบเนื่องมาจาก การเบี่ยงเบน ไปของ บีมของเรดาห์ ซึ่งลักษณะการกระจายคลื่นของเรดาห์ แสดงได้ดังภาพที่ 3.6 กรณีที่มีการเบี่ยงเบนไปของหน้าแปลน อันเนื่องมาจากการออกแบบ ตำแหน่งของหน้าแปลนที่มีระยะใกล้เคียงกับระยะที่ เรดาห์กำหนด จะส่งผลกระทบต่อให้ตำแหน่ง ของคลื่นเบี่ยงเบนไป เมื่อมีคลื่นบางส่วนไปตกกระทบกับผนังของถ้ำ จึงทำให้เรดาห์อ่านค่า ผิดเพี้ยนไปในท้ายที่สุด ในขณะที่สารต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต่างกัน



ภาพที่ 3.6 ลักษณะการกระจายคลื่นของเรดาห์

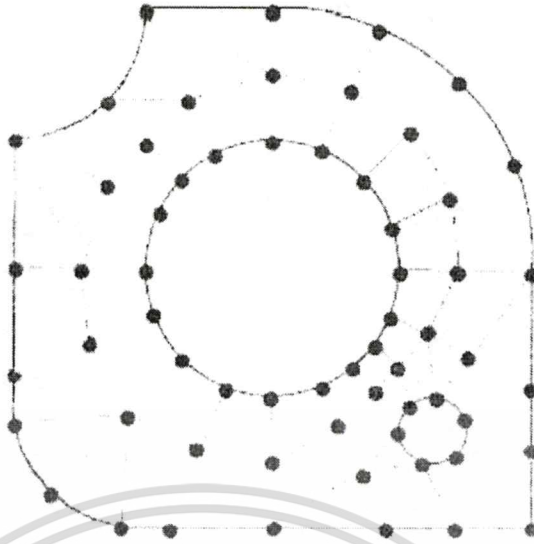
ทั้งนี้ โครงสร้างของถ้ำเองก็อาจจะป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เรดาห์อ่านค่าผิดเพี้ยนไป และเพื่อ เป็นการพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าว จึงได้นำเอาเทคนิควิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ มาทำการวิเคราะห์ ซึ่ง ปัจจุบันความสามารถในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริม ปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปราบปรามการฉ้อราษฎร์บังหลวงที่เกิดรอบตัวสามารถอธิบายได้ โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆ ได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูป ของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังตัวอย่างเช่น การคำนวณหาการกระจายทางอุณหภูมิบนเครื่องยนต์อาจ เริ่มมาจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะความสมดุลในการถ่ายเทความร้อน 1 k ารอธิบาย สถานะความสมดุลออกแบบ โครงสร้างเครื่องบินนั้นอาจเริ่มจากสมการอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะ ของความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะที่ทำการบิน 2 รวมไปถึง การ ทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุใต้ฝุ่นเพื่อจะออกข่าวเตือนประชาชนในพื้นที่ที่ ได้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปในการอพยพหนีก็อาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ได้โดยไม่ยากเลยหากแต่ว่าผลเฉลยแม่นยำตรงตามต้องการ จำเป็นต้องทำการหาออกมาโดยวิธีวิเคราะห์ นั้นทำได้ยากลำบากหรือ จะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณ นั้นมีหลาย ๆ วิธี วิธีการที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมา คือวิธีการผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) หลักการที่สำคัญของวิธีการผลต่างสืบเนื่องก็คือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสืบเนื่อง(System of Difference Method) ข้อดีของวิธีการผลต่างสืบเนื่องนี้ก็คือวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจรวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของกาใช้วิธีการผลสืบเนื่องก็มีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Application of Boundary Condition) และที่สำคัญที่สุดก็คือความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบสิ่งที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนในปัจจุบันนี้ ได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อ การพัฒนาปรับปรุงคุณภาพสิ่งของนั้น ๆ ให้ดียิ่งขึ้น

สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีหาผลเฉลย โดยประมาณวิธีใหม่ที่เรียกว่าไฟไนต์อิเลเมนต์(Finite Element Method) ที่นิยมเรียกด้วยคำว่า FEM ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนเช่นใดก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริง

ได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่าหลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับวิธีการผลต่างสืบเนื่อง กล่าวคือเริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่า อิเลเมนต์ เช่นในตัวอย่างของแผ่นอลูมิเนียมเด็มนี่สามารถแบ่งแผ่นอลูมิเนียมออกเป็นอิเลเมนต์ขนาดต่างๆ กัน โดยอิเลเมนต์ต่าง ๆ นี้จะอยู่ในรูปลักษณะของสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่มา : ปราโมทย์ เจริญอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, 2550:3

ผลประโยชน์สิ่งแรกที่ได้เห็นชัดเจนจากภาพที่ 3.7 ก็คือ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่างๆ กันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอลูมิเนียมได้ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Mode) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากที่สุด ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่จะคำนวณออกมาก็มีความแม่นยำมากขึ้น

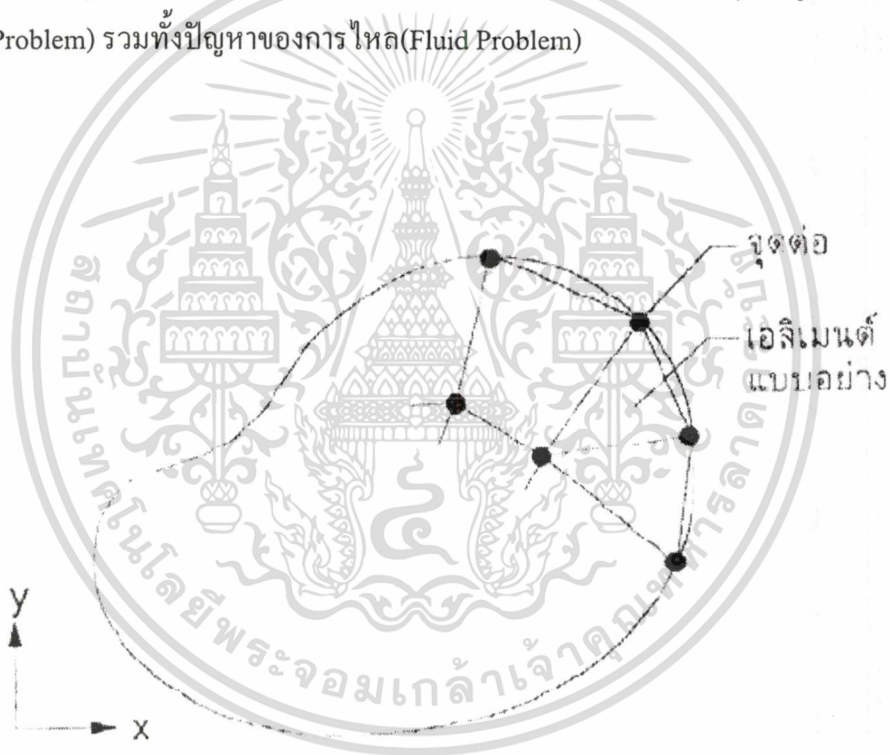
3.2 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำ ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กันตามตำแหน่งบน รูปร่างลักษณะ ของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมด นับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้หลักการก็คือ การทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนเอลิเมนต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณซึ่งมีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังเช่นที่ได้แสดงในตัวอย่างแผ่นอลูมิเนียมวิธีการดังกล่าวซึ่งบ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการ พิจารณาเอลิเมนต์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิติเมนต์โดยการสร้างสมการสำหรับแต่ละอิติเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำการเกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งมีความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุก ๆ อิติเมนต์มาประกอบความเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้ลงมาในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น วิธีการไฟไนต์อิติเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นอิติเมนต์ย่อย ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



ภาพที่ 3.8 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นอิติเมนต์แบบต่างๆ
ที่มา : ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, ไฟไนต์อิติเมนต์ในงานวิศวกรรม, 2550:16

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในอิลิเมนต์(Element Interpolation Functions) เช่น อิลิเมนต์สามเหลี่ยม (อิลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในภาพที่ 3.9) อิลิเมนต์ดังกล่าว ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ตัวที่ไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยัดตัวหัดตัว (Displacement) ถ้าเราศึกษาปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรือ อาจเป็นค่าอุณหภูมิถ้าเรากำลังศึกษา ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือ ไม่ก็อาจเป็น ความเร็วของของเหลวเกี่ยวกับการไหลเป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบน อิลิเมนต์ นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในแต่ละตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้



ภาพที่ 3.9 อิลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยจุดสามจุดต่อ โดยมีค่าไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ
ที่มา: ปราโมทย์ เฑาะอำไพ, ไฟไนต์อิลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, 2550:17

โดย $\phi(x, y) = [N_1 N_2 N_3 \quad N_i(X, Y), i = 1, 2, 3]$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในอิลิเมนต์
สมการ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้คือ

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (3.1)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในอิลิเมนต์ สมการ(3.1) สามารถเขียนให้อยู่
ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = [N1 \ N2 \ N3] \begin{bmatrix} \phi1 \\ \phi2 \\ \phi3 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} N \\ 1*3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ (3*1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \underset{(3x3)}{[C]} \underset{(3x6)}{[B]} \underset{(6x1)}{[\delta]}$$

โดย เมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอิเลเมนต์และ คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของ อิเลเมนต์นั้น ในที่นี้ สัญลักษณ์ แสดงถึง เมทริกซ์แถวอน (Row matrix) และ แสดงถึงเมทริกซ์แฉวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่3 การสร้างสมการอิเลเมนต์ (Element Equation) ดังตัวอย่างเช่นสมการของอิเลเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังภาพที่ 3.3 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้ซึ่งย่อได้เป็น

$$\begin{bmatrix} K11 & K12 & K13 \\ K21 & K22 & K23 \\ K31 & K32 & K33 \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} \phi1 \\ \phi2 \\ \phi3 \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \end{bmatrix}_e$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์ การสร้างสมการของอิเลเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (3.2) สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีการ โดยตรง (Direct Approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variation Approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอิเลเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกัน (System of Simultaneous Equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum(\text{element equations}) \rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}}$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (4.4) แล้วจึงแก้สมการนี้เพื่อหา อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Node Unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลเป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างเราก็สามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความดัน (Stress) ได้ต่อจากขั้นตอนที่ทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์เป็นวิธีการที่มีระบบแบบแผนเป็นขั้นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการอิเลเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3)

3.3 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์

เนื่องจาก รูปแบบของชิ้นงานต่างๆ ในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ นับตั้งแต่ปัญหาการยึดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัสดุ ตลอดจนการไหลของไหลความเข้าใจนี้เองช่วยให้เรามองเห็นภาพรวมและ ประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์ที่สามารถ นำไปใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่าง ๆ กันได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้น ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ประสิทธิภาพของการไฟไนต์อิเลเมนต์ควบคู่ไปกับวิวัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยสะดวกและในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้ได้มาก

การแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรกเริ่มมีให้เห็นในทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) และ โครงสร้างเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากปรากฏการณ์ต่างที่เกิดขึ้นในทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยากนักวิวัฒนาการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านของแข็งนี้ในปัจจุบันสามารถนำไปใช้ควบคู่กับการออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น เพลาจ้อเหวี่ยงเครื่องยนตร์ การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติจำนวนมากที่มีขนาดต่างๆ กันประกอบกันขึ้นมาและสามารถจำลองรูปแบบของเพลาดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรงเนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบยานพาหนะเพื่อให้ออกประสิทธิภาพสูงขึ้นรวมทั้งเพื่อความปลอดภัยที่สูงสุด และขณะเดียวกันก็เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 3.10 แสดงการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และการยุบตัวของโครงสร้างรถยนต์ขนาดเกิดการชน การออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อความปลอดภัยดังตัวอย่างเช่น คานที่วางตัวตามแนวยาวของตัวรถควรให้เกิดแต่การหดตัวที่สั้นลงในขณะที่เกิดการชน โดยให้มีการโก่งขึ้นน้อยที่สุด เป็นต้น การออกแบบด้วยการทดลองเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่ต้องการจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมากเพื่อเปรียบเทียบกับกรออกแบบด้วยการคำนวณซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนรูปแบบได้ง่ายทำให้ผู้ออกแบบสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปแบบรถได้โดยง่ายและรวดเร็วเพื่อที่จะได้รูปแบบที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงสุดก่อนที่จะนำไปสร้างแบบจริงเพื่อใช้ในการทดลองและทำการผลิตต่อไป



ภาพที่ 3.10 การประยุกต์วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถ

ที่มา : ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, 2547:25

3.4 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์อิเลเมนต์ กับของแข็ง

3.4.1 สมการเชิงอนุพันธ์

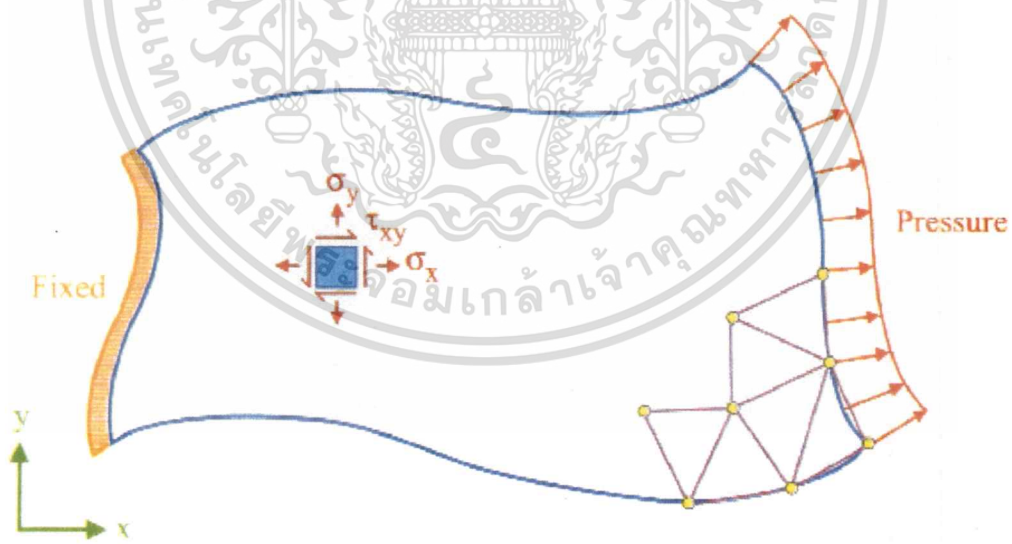
เริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งแสดงความสมดุลของแรงในแนวแกน x และ y บนแผ่นระนาบเมื่อไม่คิณน้ำหนัก ของตัวเอง ดังแสดงในภาพที่ 3.11 คือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \tag{3.4}$$

โดยแทน σ_x, σ_y แทนค่า ด้วยความเค้นฉาก (normal stress) ในแนวแกน x, y ตามลำดับ ส่วน τ_{xy} แทนค่าความเค้นเฉือน (shearing stress)

ในกรณีของแผ่นบางซึ่งเป็นปัญหาความเค้นในแนวระนาบ (plane stress) ค่าความเค้น σ_z ในแนวตั้งฉากกับแผ่นถูกสมมติให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าความเค้นย่อยต่างๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของค่าความเครียดย่อย (strain component) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$



ภาพที่ 3.11 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นระนาบ
ที่มา : ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, ไฟไนต์อิเลเมนต์อย่างง่าย, 2548: 135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย E แทนค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's modulus) และ ν แทนค่าอัตราส่วนของ ปัวส์ซอง (Poisson's ratio) ส่วน $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ แทนค่าความเครียดฉาก (normal strain) ในแนวแกน x, y ตามลำดับ และ γ_{xy} แทนค่าความเครียดเฉือน ค่าความเครียดเหล่านี้เขียนให้อยู่ในรูปแบบของค่าการเสียรูป u และ v ในแนวแกน x, y ได้คือ

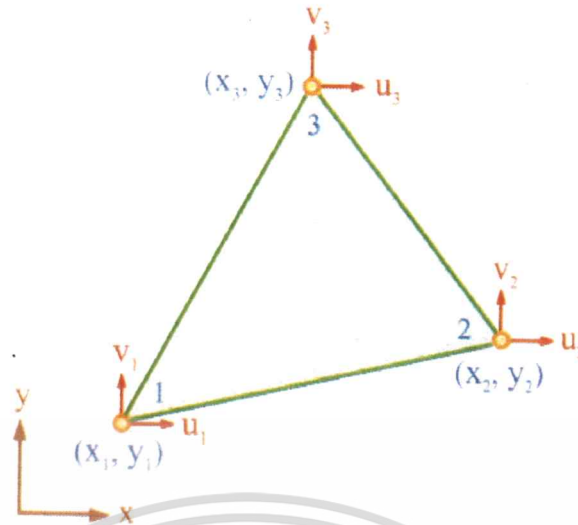
$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\quad (3.6)$$

ซึ่งหมายถึงว่าตัวไม่รู้ค่าในปัญหาแผ่นระนาบมีเพียง 2 ค่า คือ u และ v เมื่อทราบค่า u และ v แล้วจึงสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเครียด และความเค้นย่อย ต่างๆ ได้ตามลำดับเหตุผลนี้เอง ทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ (3.4) ของปัญหาแผ่นระนาบประกอบด้วย 2 สมการย่อย แต่มักเขียนแสดงในรูปของค่าความเค้นย่อย เพื่อสะดวกและความสั้นกระชับในตัวเอง

อนึ่ง สำหรับปัญหาที่ค่าความเครียดในแนวแกน z ถูกสมมุติให้มีค่าเป็นศูนย์ (plane strain) สมการเชิงอนุพันธ์ (3.4) และ สมการ (3.6) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดย่อยและค่าการเสียรูป ยังคงใช้ได้เช่นเดิม ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นย่อยและความเครียดย่อยดังแสดงในสมการ (3.5)

3.4.2 สมการไฟไนต์อิลิเมนต์

สมการไฟไนต์อิลิเมนต์ (finite element equation) สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (3.5) โดยการประยุกต์ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ก่อให้เกิดสมการในรูปแบบของอินทิกรัล (integral form) บนพื้นที่ของอิลิเมนต์ การเลือกใช้อิลิเมนต์ชนิดต่างกันจะนำไปสู่ไฟไนต์อิลิเมนต์เมตริกซ์ในรูปแบบที่ต่างกัน อิลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมอันประกอบไปด้วยสามจุดต่อ ดังแสดงในภาพที่ 3.12 จัดได้ว่าเป็นอิลิเมนต์พื้นฐานที่ก่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย รวมทั้งสะดวกในการประดิษฐ์สมการไฟไนต์อิลิเมนต์ และอิลิเมนต์เมตริกซ์ที่สอดคล้องกันด้วย



ภาพที่ 3.12 อีลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ
ที่มา : ปราโมทย์ เจริญอำไพ, ไฟไนต์อีลิเมนต์อย่างง่าย, 2548: 137

ลักษณะการกระจายของค่าการเสียรูป u และ v บนอีลิเมนต์ถูกสมมติให้อยู่ในรูปแบบแผ่นเรียบ (flat [lane) คือ

$$\begin{aligned} u(x, y) &= N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \\ v(x, y) &= N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 \end{aligned} \quad (3.7)$$

โดย $N_i, i=1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณในอีลิเมนต์ (element interpolation functions) ซึ่งคือ

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (3.8)$$

และ A แทนพื้นที่อีลิเมนต์ของสามเหลี่ยม ส่วน a_i, b_i, c_i นั้นขึ้นอยู่กับโคออดิเนต x_i และ y_i ที่จุดต่อ i ค่าพื้นที่และค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยตรงจากตำแหน่งของจุดต่อ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากสร้างรูปแบบไฟไนต์อีลิเมนต์แล้ว

หลังจากประยุกต์ระเบียบวิธีถ่วงเศษคกต่างเข้ากับสมการเชิงอนุพันธ์ (3.4) – (3.8) ก่อให้เกิดสมการไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังนี้

$$[K][\delta] = [F] \quad (3.9)$$

(6x6) (6x1) (6x1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $[K]$ แทนเมตริกซ์ของความแข็งเกร็ง

$$[K] = [B]^T [C] [B] t A \quad (3.10)$$

(6x6) (6x3) (3x3) (3x6)

เมตริกซ์ $[B]$ แทนเมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและค่าการเสียรูป

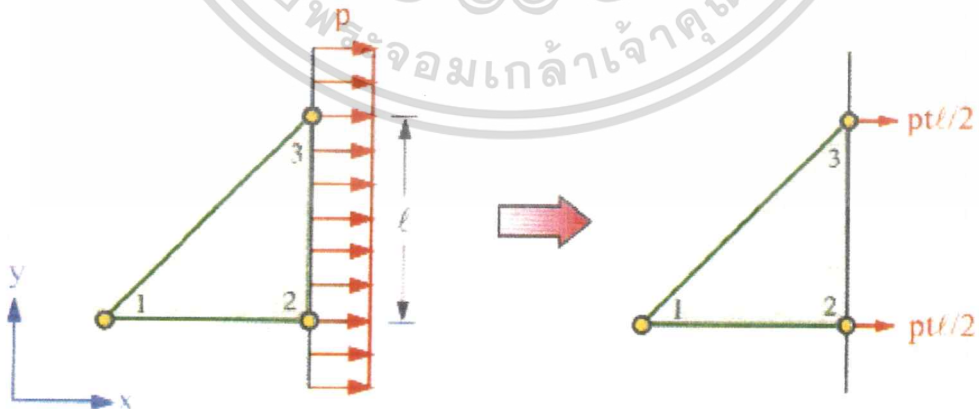
$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

เมตริกซ์ $[C]$ แทนเมตริกซ์ขนาด 3×3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังแสดงในสมการ (3.5) หรือ (3.7) สำหรับกรณี plane stress และกำหนดให้มีค่าเท่ากับหนึ่งในกรณีของ plane strain

เวกเตอร์ $[\delta]$ ในสมการไฟไนต์อีลิเมนต์ (3.9) ประกอบด้วยค่าการเสียรูป u และ v ที่จุดต่อทั้ง สาม

$$[\delta] = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3] \quad (3.12)$$

ส่วนเวกเตอร์ $[F]$ ทางด้านขวาของสมการแสดงถึงโหนดเวกเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดันที่กำหนดให้ตามขอบ ยกตัวอย่างเช่น อีลิเมนต์ในภาพที่ 3.13 มีจุดต่อหมายเลข 2 และ 3 บนขอบที่ตั้งฉากกับแนวแกน x และหากขอบนี้ถูกระงับด้วยแรงดึงต่อพื้นที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ p แล้ว



ภาพที่ 3.13 การแปลงแรงดึงตลอดขอบไปสู่ที่จุดต่อ

ที่มา : ปราโมทย์ เคะอำไพ, ไฟไนต์อีลิเมนต์อย่างง่าย, 2548: 139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ $[F]$ ของอิเลเมนต์ที่ติดอยู่กับขอบดังแสดงในภาพที่ 3.5 คือ

$$[F] = [0 \ 0 \ ptl/2 \ 0 \ ptl/2 \ 0] \quad (3.13)$$

เป็นต้น อนึ่ง หากขอบที่มีแรง ต่อพื้นที่มากระทำนี้เพียง โดยไม่ได้ตั้งฉากกับแกน x หรือ y หลักการข้างต้นนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการทำงานเดียวกัน หลังจากสมการไฟไนต์อิเลเมนต์ของแต่ละอิเลเมนต์ถูกสร้างขึ้นแล้วจึงนำสมการเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกันทั้งหมด ก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งมีขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับเงื่อนไขนั้นๆ เช่นบางจุดต่ออาจถูกตรึงแน่นทั้งในแนวแกน x และ y หรือบางจุดต่อ อาจถูกตรึงในแนวแกน y เพียงทิศทางเดียว ในขณะที่ยังสามารถเคลื่อนตัวในแนวแกน x ได้ เป็นต้น ลงในระบบสมการรวมใหญ่นั้น ก่อนแก้สมการรวมทั้งระบบนั้น เพื่อหาค่าการเสียรูป u และ v ของทุกๆ จุดต่อ

เมื่อทราบค่าการเสียรูป u และ v ของทุกๆ จุดต่อแล้วจึงหาค่าความเครียดย่อย $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ โดยใช้สมการ (3.6) ผสมผสานกับสมการ (3.7) แล้วจึงหาค่าความเค้นย่อย $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ของแต่ละอิเลเมนต์โดยใช้สมการ (3.5) สำหรับกรณี plane stress หรือ plane strain ตามลำดับ ซึ่งค่าความเค้นย่อยนี้สามารถเขียนเป็นสมการสั้นๆ ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \underset{(3 \times 3)}{[C]} \underset{(3 \times 6)}{[B]} \underset{(6 \times 1)}{[\delta]} \quad (3.14)$$

อนึ่งค่าความเค้นย่อยที่คำนวณได้จากสมการ(3.14) นี้มีค่าคงที่สำหรับแต่ละอิเลเมนต์ ซึ่งอาจจะกระจายไปยังจุดต่อต่างๆเพื่อการแสดงผลให้ดูเหมาะสมสอดคล้องกับความเป็นจริงต่อไป

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 บทนำ

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

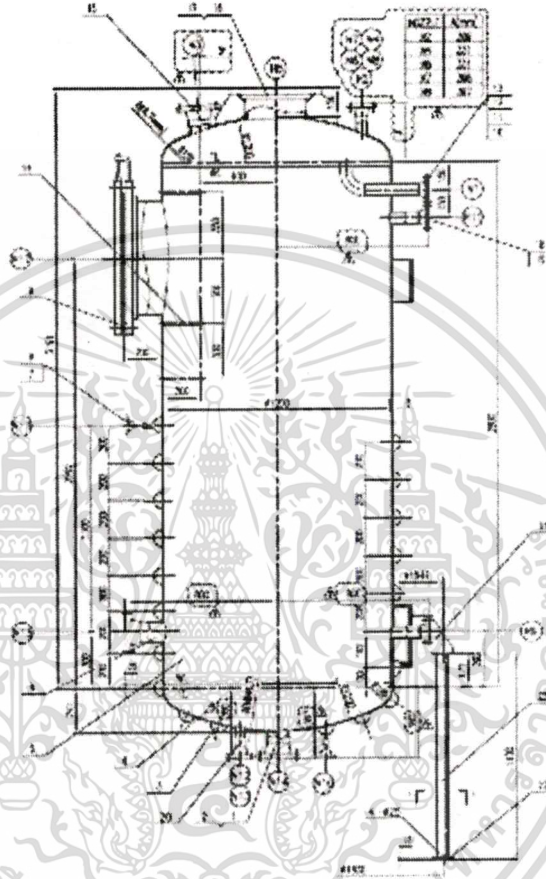
1. การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ
2. การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์
3. การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์
4. การรวบรวมไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่
5. การคำนวณหาค่าอื่นๆที่เหลือ

กระบวนการแก้ปัญหาไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมประกอบด้วย 3 ขั้นตอนด้วยกันดังนี้

1. กระบวนการขั้นต้น (pre processor) : การสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จากรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหา จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนทำการวิเคราะห์
2. กระบวนการวิเคราะห์ (analysis) : ข้อมูลต่างๆของรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นและ เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดในขั้นตอนแรก จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม
3. กระบวนการขั้นท้าย (post process) : แสดงผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์ซึ่งสามารถแสดงได้หลายชนิด ตั้งแต่แสดงด้วยชั้นสี (fringe plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (contour lines) การแสดงด้วยเวกเตอร์ (vector plot) เป็นต้น

4.2 การทดลอง และผลการทดลอง

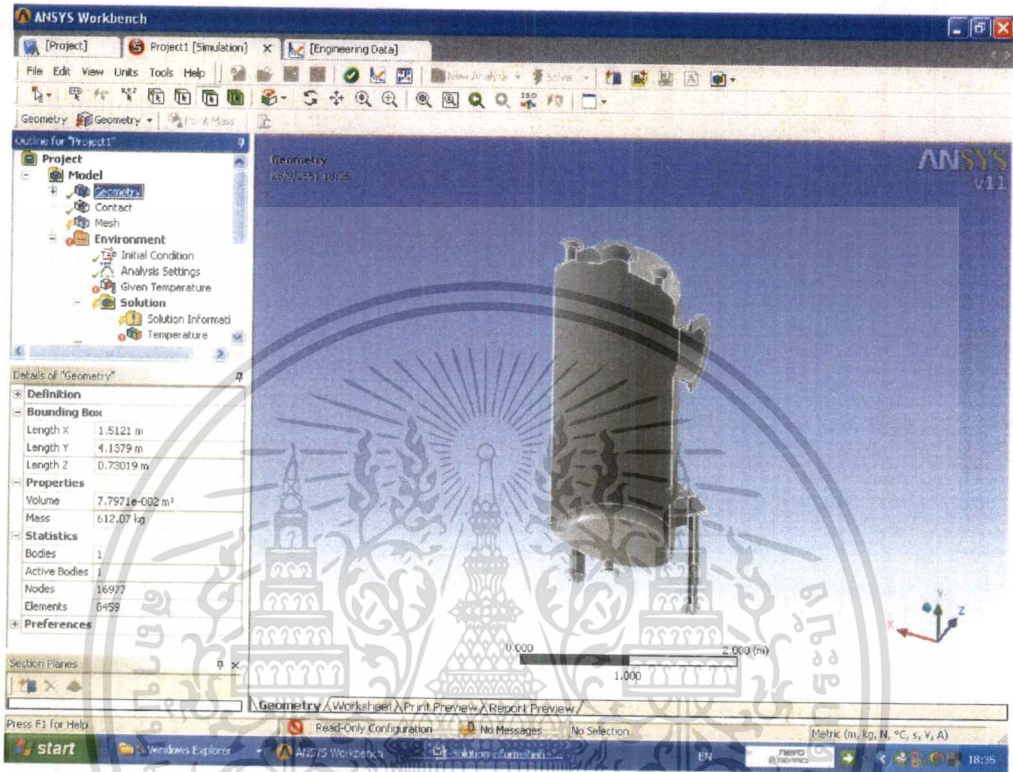
ภาพที่ 4.1 แสดงภาพ ถังสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานการอ่านค่าที่ผิดเพี้ยน ไปของเรดาร์ อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการผิดรูปไปของถังในกรณีศึกษา โดยใช้เทคนิควิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม แอนซิส (ANSYS)



ภาพที่ 4.1 ถังสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

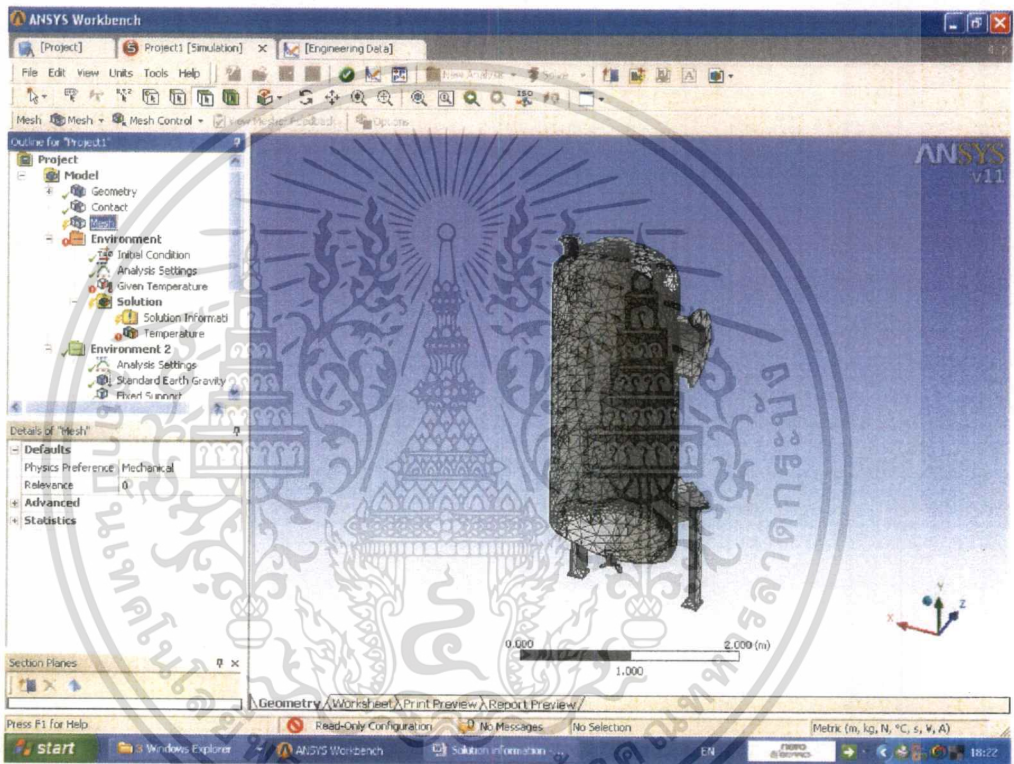
ขั้นตอนที่ 1 สร้างโมเดลจำลองของถัง พร้อมทั้งกำหนดขนาดของถังทั้งสามแนวแกนตามขนาดของถังรวมถึงตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ ปริมาตร และน้ำหนักของถัง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ในส่วนส่วนของ Detail of Geometry



ภาพที่ 4.2 รูปถังที่สร้าง ตามขนาดของถังจริง

หลังจากที่ทำการสร้างโมเดลจำลองของถัง พร้อมทั้งกำหนดขนาดและ น้ำหนักของถังเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในลำดับต่อไป

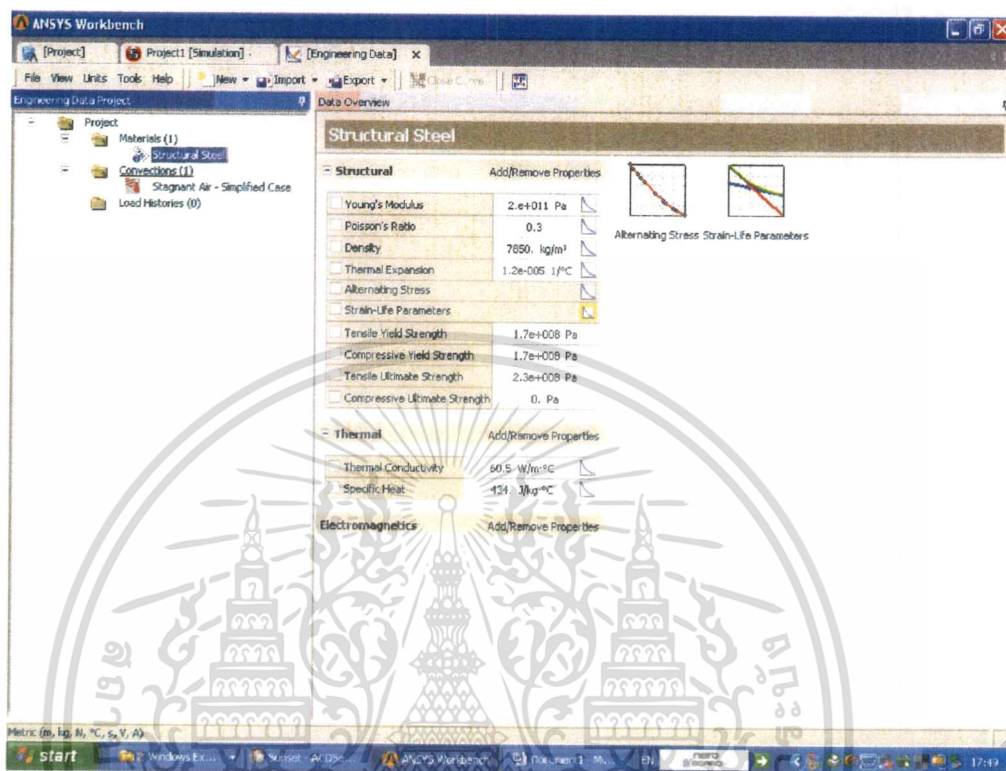
ขั้นตอนที่ 2 กำหนด อติเม้นต์ย่อยให้กับถัง โดยในการทดลองนี้ กำหนดให้ใช้อิเม้นต์ย่อยแบบสามเหลี่ยมไว้ระเบียนเพื่อทำการวิเคราะห์ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.3 เนื่องจากในอติเม้นต์ แต่ละแบบจะสอดคล้องกับลักษณะของการกระจายของตัวที่ไม่ทราบค่าที่ถูกสมมุติ ขึ้นมาบนอติเม้นต์นั้นๆ เช่น หากเลือกแบบสามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะของการกระจายตัวไม่ทราบค่าจะถูกสมมุติให้อยู่ในรูปของแผ่นเรียบ หาก เลือกใช้แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ ลักษณะการกระจายของตัวไม่ทราบค่า อาจไม่เรียบแต่สามารถโค้งไปมาได้ ทั้งนี้การใช้ อติเม้นต์แต่ละแบบจะให้ผลในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.3 รูปถังที่ถูกกำหนดอติเม้นต์ย่อยแบบสามเหลี่ยมไว้ระเบียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

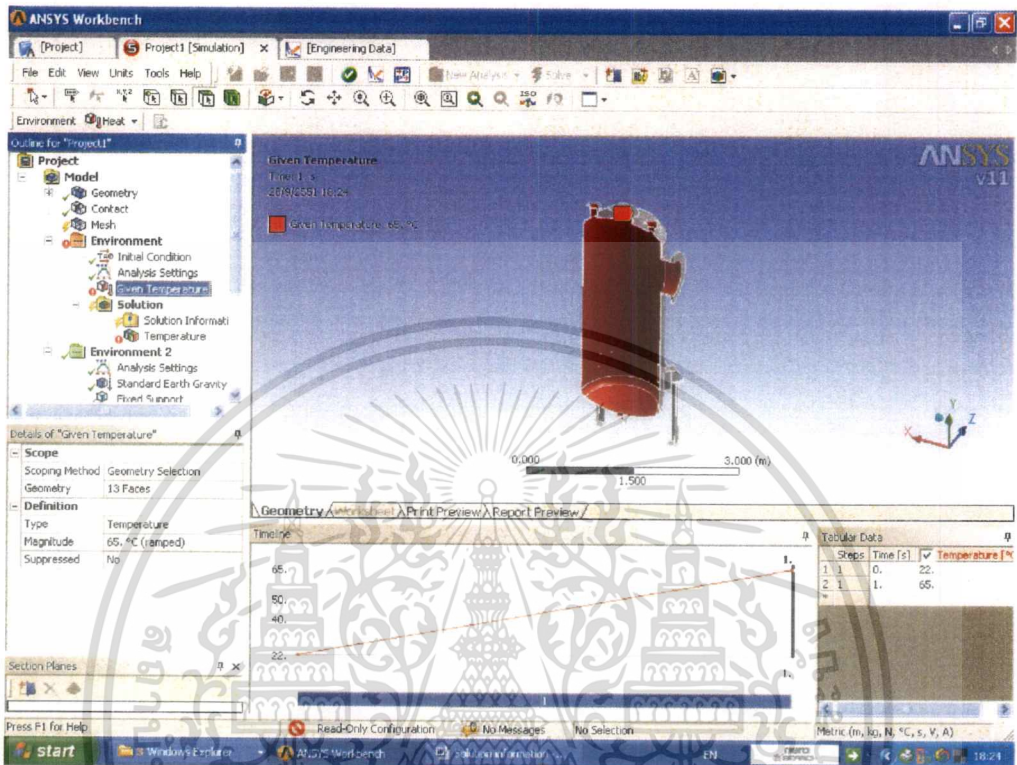
ขั้นตอนที่ 3 ป้อนค่า สมบัติต่างๆของโลหะ ดัง แสดงใน ภาพที่ 4.4 ในส่วนของ Structural Steel



ภาพที่ 4.4 แสดงสมบัติต่างๆของโลหะ

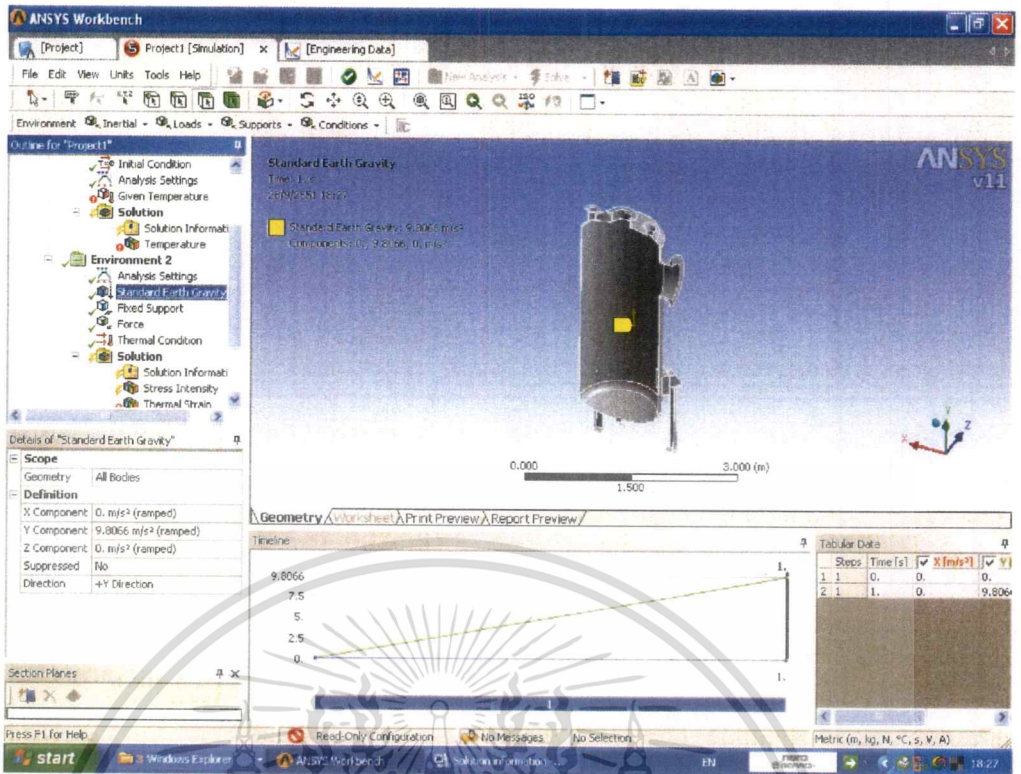
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 ทำการกำหนดค่า แรง, อุณหภูมิภายในและ ภายนอกที่มากกระทำกับถัง และ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม ดังแสดงใน ภาพที่ 4.5 ถึง 4.7

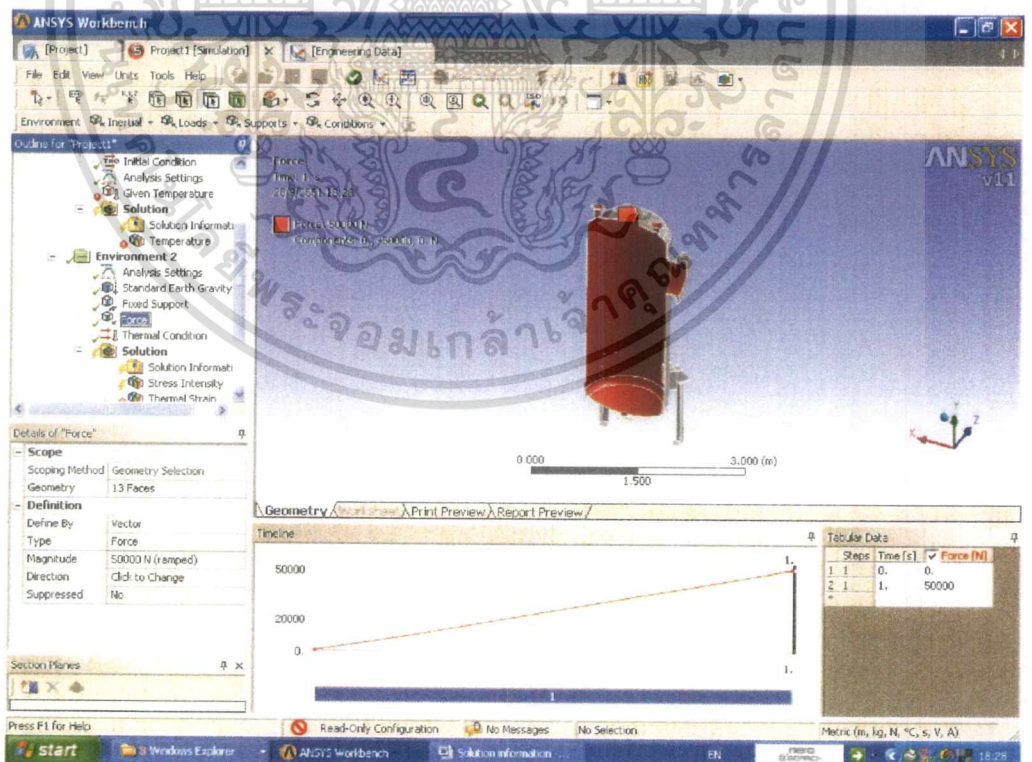


ภาพที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 แสดงค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ภายใต้สภาวะแวดล้อม

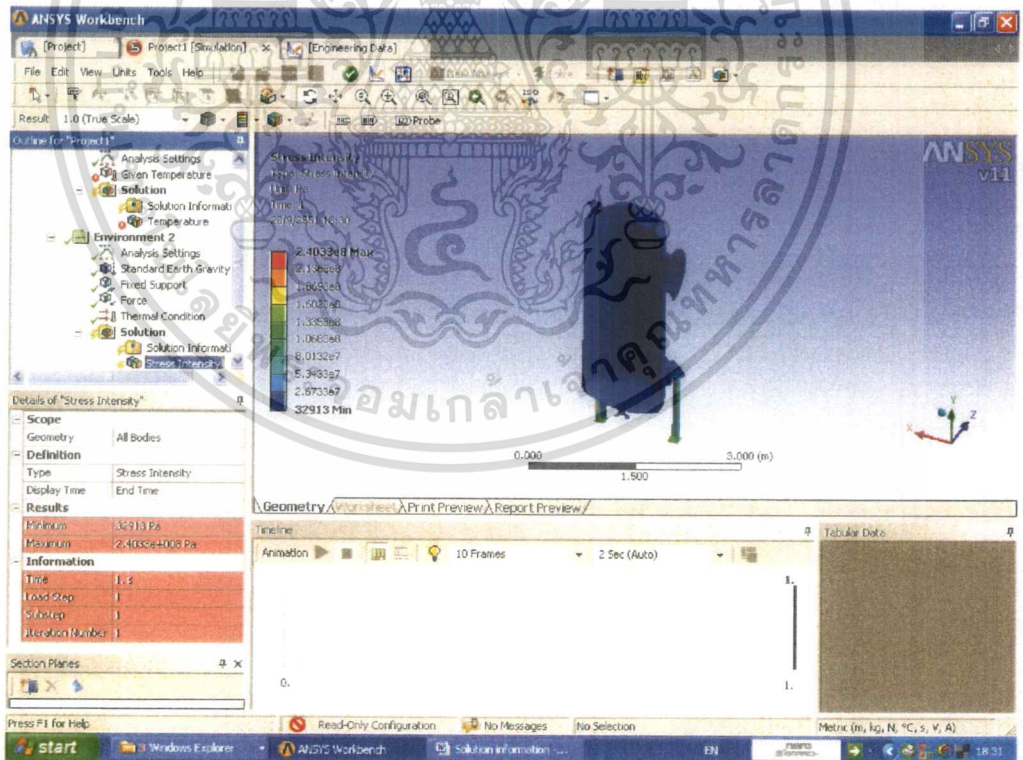


ภาพที่ 4.7 แสดงค่าแรงจากภายนอกที่มากระทำ ภายใต้สภาวะแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

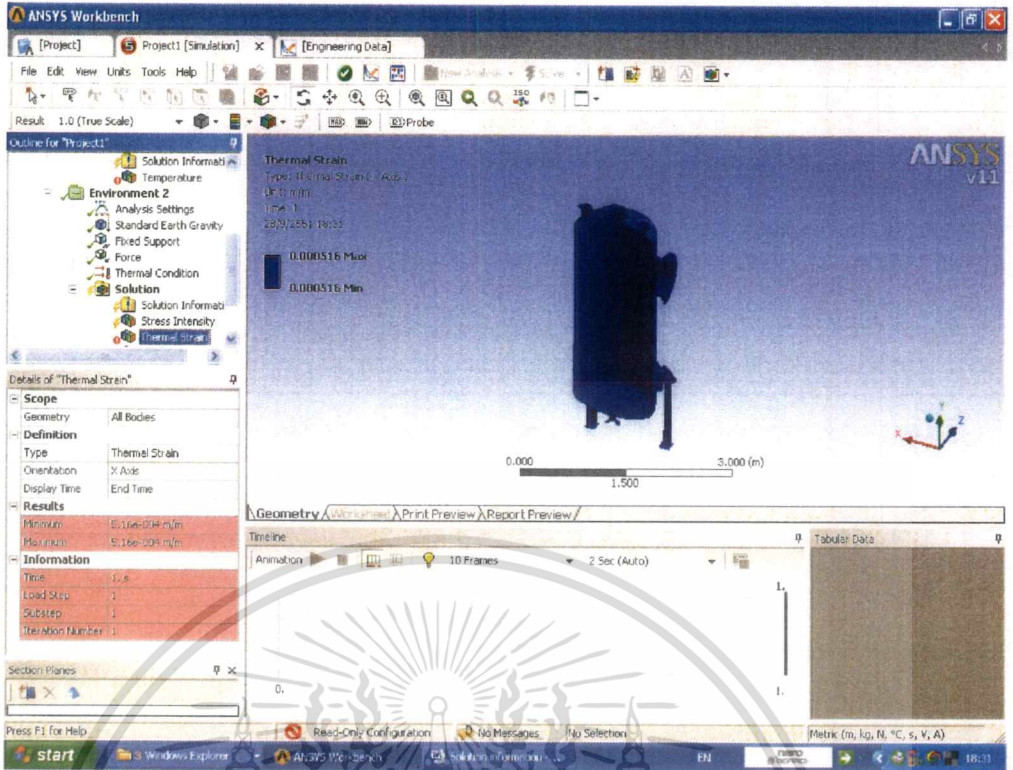
หลังจากที่เราทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของรูปแบบไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สร้างขึ้น และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์โปรแกรม โดยไฟไนต์อิลิเมนต์โปรแกรม จะสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สอดคล้อง กับปัญหาสำหรับทุกๆ อิลิเมนต์ ก่อนที่จะนำมาประกอบเป็นสมการใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ จากนั้นจึงแก้ระบบสมการใหญ่ โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณขึ้นอยู่กับจำนวนอิลิเมนต์ทั้งหมดที่ถูกสร้าง กระบวนการขั้นท้าย ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 ผลลัพธ์ที่เกิดจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ผ่านมาจะประกอบไปด้วยตัวเลขเป็นจำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์กราฟิกส์ ซึ่งลักษณะการแสดงผลนั้นก็มีหลายชนิดด้วยกัน นับตั้งแต่การแสดงด้วยแถบชั้นสี (fringe plot) การแสดงด้วยเส้นชั้นสี (contour lines) การแสดงด้วยเวกเตอร์ (vector plot) เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้เลือกแสดงผลการวิเคราะห์แบบแถบชั้นสี (fringe plot) ดังจะพบได้ ดังภาพการประมวลผลค่าความเครียด ความเค้น ณ. จุดต่างๆ ดังแสดงใน ภาพที่ 4.8 ถึง 4.12

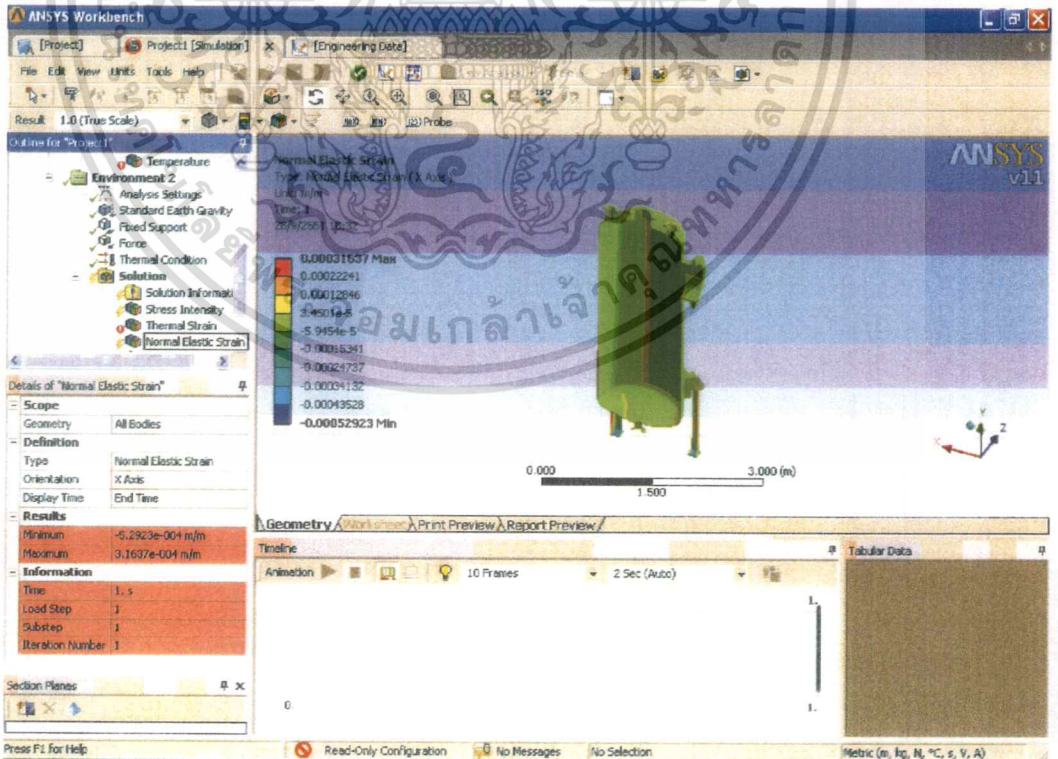


ภาพที่ 4.8 แสดงค่าความเครียดวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

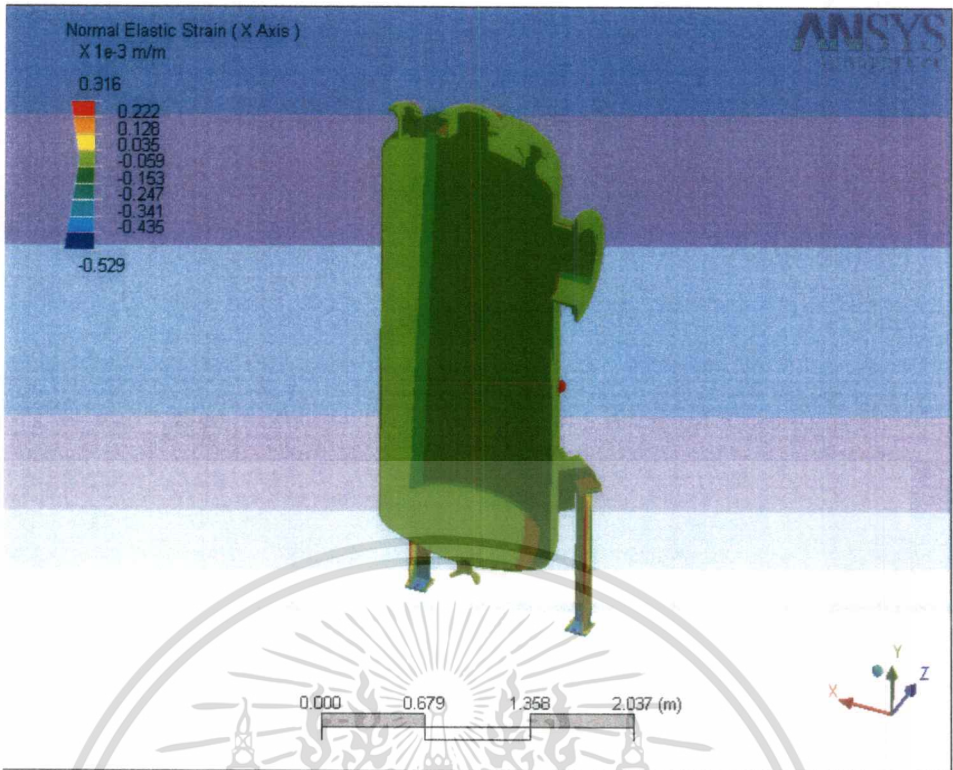


ภาพที่ 4.9 แสดงค่าความเค้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

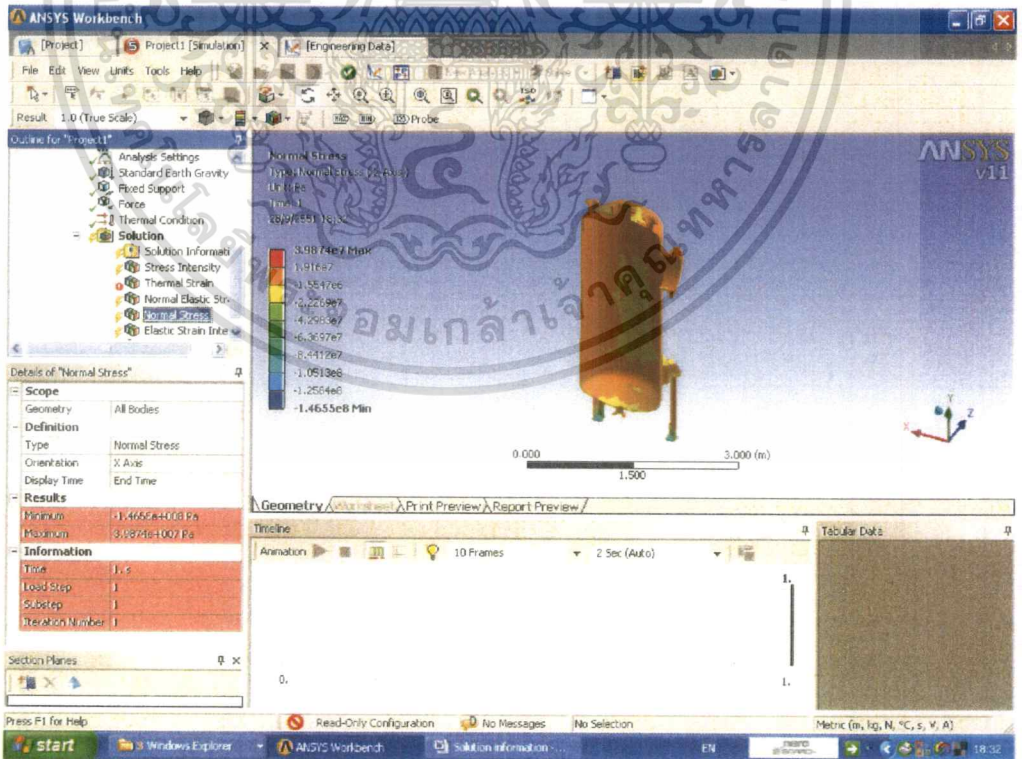


ภาพที่ 4.10 แสดงค่าความเค้นแบบคั้นรูปภายใต้สภาวะปกติ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

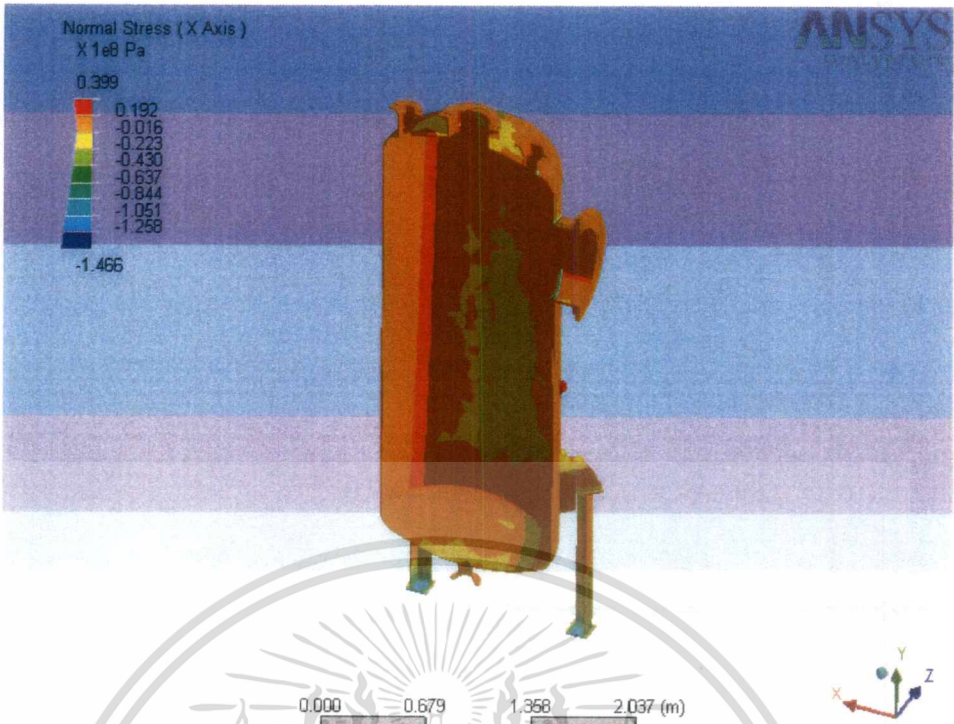


ภาพที่ 4.11 แสดงค่าความเค้นแบบคั้นรูปภายใต้สภาวะปกติ (2)

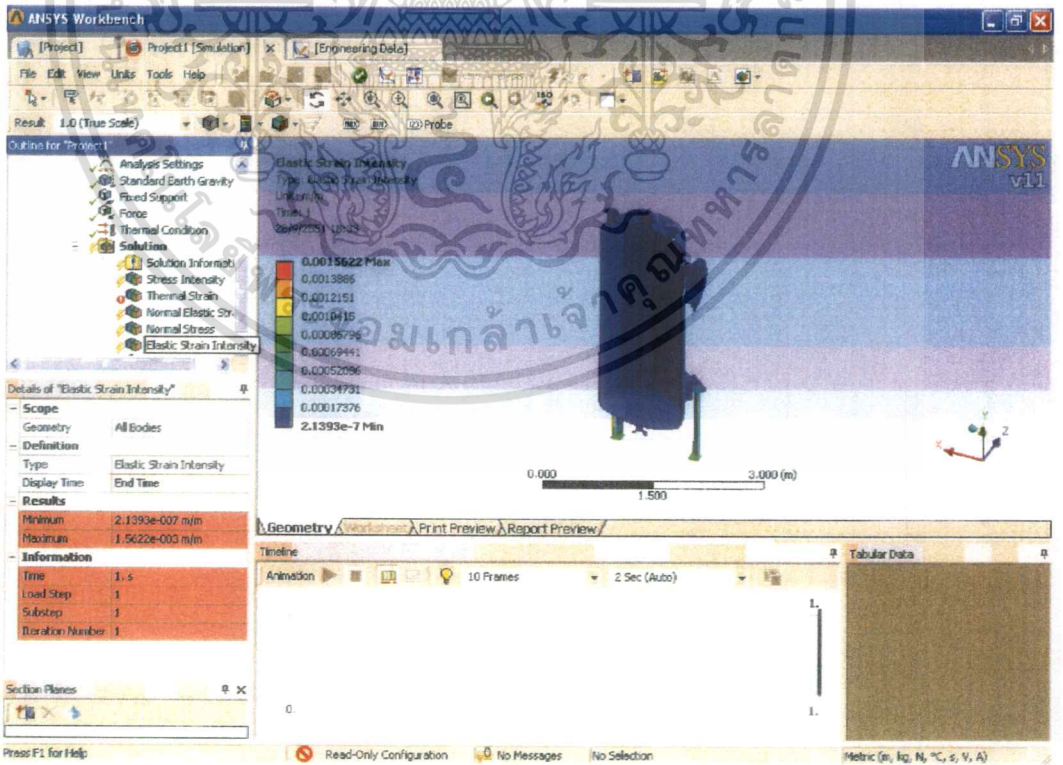


ภาพที่ 4.12 แสดงค่าความเค้นปกติ(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 แสดงค่าความเค้นปกติ(2)



ภาพที่ 4.14 แสดงค่าความเค้นแบบคิ่นรูปภายใต้สภาวะวิกฤติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากข้อสมมุติฐานที่ว่า การอ่านค่าที่ผิดเพี้ยนไปของเรดาร์ เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเบี่ยงเบนไปของ บีมของเรดาร์ อันเนื่องจากการผิดรูปไปของโครงสร้างถึง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีไฟไนต์อิลิเมนต์พบว่าบริเวณแนวเชื่อมของถัง และขาถัง และบริเวณหน้าแปลนเป็นจุดที่มีค่าความเครียดมาก ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.10, 4.11 และ 4.13 กรณีที่น้ำหนักของถัง และอุณหภูมิของของเหลว เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในปริมาณของของเหลว ส่งผลให้ถึงเกิดการยืดหดขยายตัว ผนวกกับ ปัจจัยแวดล้อมต่างๆขณะที่มีการติดตั้งใช้งานผ่านไปในระยะหนึ่งเมื่อถึงมีการผิดรูปไป หน้าแปลนซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนหัวถังจึงผิดตำแหน่งไปด้วย และเมื่อเกิดการเบี่ยงเบนไปของหน้าแปลนผลที่ตามมาคือ คลื่นของเรดาร์บางส่วนเกิดการตกกระทบกับผนังของถัง บางส่วนตกกระทบที่สาร ดังนั้นเมื่อสัญญาณสะท้อนกลับไปยังตัวรับของเรดาร์ ค่าที่ เรดาร์อ่านได้จึงมีค่าค่าผิดเพี้ยนในท้ายที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาถึงหลักการทำงานของเรดาร์ ซึ่งอาศัยหลักการทำงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าเรดาร์ไม่มีผลกับอุณหภูมิ แรงดัน และแม้แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ ที่ให้ความถูกต้องแม่นยำในการวัดสูง ขณะเดียวกันเรดาร์ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่อสภาวะแวดล้อมสูง ซึ่งในทางปฏิบัติในระบบที่มี ฟองอากาศ มาก หรือ มีความเป็นไอน้ำมาก จึงควรหลีกเลี่ยง เนื่องจากตำแหน่งของคลื่นที่ตกกระทบ และเกิดการสะท้อนกลับจะไม่ใช้ตำแหน่งจริงของระดับที่ต้องการวัด ส่งผลให้การอ่านค่าผิดเพี้ยนไปในท้ายที่สุด ดังนั้นการติดตั้งใช้งานเรดาร์ รวมถึงอุปกรณ์เครื่องมือวัดชนิดต่างๆ จึงควรที่จะปฏิบัติตามคู่มือในการติดตั้ง และใช้อย่างเคร่งครัด เพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้

บรรณานุกรม

- [1] Adams, S & Allday, J. 2000. **Advanced Physics**. Oxford: Oxford University.
- [2] Cutnell, J.D. & Johnson, K.W. 2001. **Physics**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
- [3] Serway, R.A. & Beichner, R.J. 2000. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics** 5th ed. Orlando:Harcourt College.
- [4] Serway, R.A. & Jewett, J.W. 2004 **Physics for Scientists and Engineers** 6th ed. Belmont:Brooks/Cole-Thomson Learning.
- [5] Walk, J.S. 2004 **Physics** 2nd ed. New Jersey: Pearson Education.
- [6] Wilson, J .D. & Buffa ,A.J. 2003 **College Physics with Modern Physics**. 10th ed. San Francisco : Addison Wesley Longman
- [7] Peter Devine ,**Radar Level Measurement the user guide**
- [8] William H.Hayt,JR **Engineering Electromagnetic** (Fifth Edition)
- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์อิลิเมนต์ ในงานวิศวกรรม
- [10] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์อิลิเมนต์ อย่างง่าย
- [11] วีระศักดิ์ ขอบขุนทด, แม่เหล็กไฟฟ้า



ภาคผนวก ก.

การใช้โปรแกรม ANSYS Version 11 Release 8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solver Output

ANSYS Multiphysics

```

-----*
| WELCOME TO THE ANSYS PROGRAM |
|-----*

```

```

*****
*                               ANSYS 8.1 LEGAL NOTICES                               *
*****
*
* Copyright 2004 SAS IP, Inc. All rights reserved.
* Unpublished rights reserved under the Copyright Laws of
* the United States.
*
* ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001: 2000 Company
*
* See the ANSYS, Inc. online documentation or the ANSYS, Inc.
* documentation CD for the complete Legal Notice.
*****
*
* DISCLAIMER NOTICE
*
* Information in this Information System is subject to
* change without notice. Complying with all applicable
* copyright laws is the responsibility of the user. No part
* of this system may be reproduced or transmitted in any
* form or by any means, electronic or mechanical, without
* prior written permission of ANSYS, Inc.
*
* This document has been reviewed and approved in accordance
* with ANSYS, Inc. Documentation Review and Approval
* Procedures.
*
* This ANSYS, Inc. software product and program
* documentation are furnished by ANSYS, Inc. under an ANSYS
* software license agreement that contains provisions
* concerning non-disclosure, copying, length and nature of
* use, warranties, disclaimers and remedies, and other
* provisions. The Program and Documentation may be used or
* copied only in accordance with the terms of that license
* agreement.
*
*
* THIS SOFTWARE CONTAINS CONFIDENTIAL INFORMATION AND TRADE
* SECRETS OF SAS IP, INC. USE, DISCLOSURE, OR REPRODUCTION
* IS PROHIBITED WITHOUT THE PRIOR EXPRESS WRITTEN PERMISSION
* OF SAS IP, INC.
*
* ANSYS, Inc. may have patents, patent applications,
* trademarks, copyrights, or other intellectual property
* rights covering subject matter in this documentation and
* product. Except as expressly provided in any written
* license agreement from ANSYS, Inc., the furnishing of any
* product does not give you any license to these patents,
* trademarks, copyrights, or other intellectual property.
*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

* Warning: This computer program is protected by copyright *
* law and international treaties. Unauthorized reproduction *
* or distribution of this program, or any portion of it, may *
* result in severe civil and criminal penalties, and will be *
* prosecuted to the maximum extent possible under the law. *
* *
*****
*
* U.S. GOVERNMENT RIGHTS
*
* Use, duplication, or disclosure by the U.S. Government is
* subject to restrictions set forth in the ANSYS, Inc.
* license agreement and as provided in DFARS 227.7202-1(a)
* and 227.7202-3(a) (1995), DFARS 252.227-7013(c)(1)(ii) (OCT
* 1988), FAR 12.212(a) (1995), FAR 52.227-19, or FAR52.227-14
* (ALT III), as applicable. ANSYS, Inc.
*
*****

```

Completing ANSYS Load Process.

```

***** ANSYS COMMAND LINE ARGUMENTS *****
BATCH MODE REQUESTED = NOLIST
MEMORY REQUESTED (MB) = 85
START-UP FILE MODE = NOREAD
STOP FILE MODE = NOREAD
DATABASE SIZE REQUESTED (MB) = 35

*** WARNING *** CP= 0.203 TIME= 01:58:20
Use of the -M switch is no longer recommended for normal ANSYS use.
ANSYS now dynamically allocates memory as needed. Only use the -M
switch if you are certain that you need to do so.

PARAMETER STATUS- ( 1 PARAMETERS DEFINED)
(INCLUDING 1 INTERNAL PARAMETERS)

00265231 VERSION=INTEL NT RELEASE= 8.1 UP20040329
CURRENT JOBNAME=file 01:58:20 AUG 11, 2008 CP= 0.203

PARAMETER_DS_PROGRESS = 999.0000
/INPUT FILE= ds.dat LINE= 0

NUMBER OF PROCESSORS TO USE (NPROC)= 2

*GET WALLSTRT FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 1.97222222

*****TRACK MONITOR LEVEL= -1
TRACK PRINT LEVEL = 0
TRACK SUMMARY LEVEL= 0

1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 8.1 *****
ANSYS Multiphysics
00265231 VERSION=INTEL NT 01:58:20 AUG 11, 2008
CP= 0.219

```

***** ANSYS ANALYSIS DEFINITION (PREP7) *****

***** Nodes for Part 1 *****

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

***** Elements for Part 1 *****
***** Send Materials *****
***** Send Sheet Properties *****
***** Send Beam Properties *****
***** Displacements *****
***** Create Pressure Vector for Surface Force(s) *****
***** Send Solved Temperatures *****
***** Send Component Needed For Reactions *****

```

```

**** ROUTINE COMPLETED **** CP = 1.125

```

```

--- Number of total nodes = 16977
--- Number of contact elements = 0
--- Number of spring elements = 0
--- Number of solid elements = 8459
--- Number of total elements = 11187
--- Data in consistent MKS units.

```

SI UNITS SPECIFIED FOR INTERNAL

```

LENGTH (l) = METER (M)
MASS (M) = KILOGRAM (KG)
TIME (t) = SECOND (SEC)
TEMPERATURE (T) = KELVIN (K)
TOFFSET = 0.0 KELVIN
CHARGE (Q) = COULOMB
FORCE (f) = NEWTON (N) (KG-M/SEC2)
HEAT = JOULE (N-M)

```

```

PRESSURE = PASCAL (NEWTON/M**2)
ENERGY (W) = JOULE (N-M)
POWER (P) = WATT (N-M/SEC)
CURRENT (i) = AMPERE (COULOMBS/SEC)
CAPACITANCE (C) = FARAD
INDUCTANCE (L) = HENRY
MAGNETIC FLUX = WEBER
RESISTANCE (R) = OHM
ELECTRIC POTENTIAL = VOLT

```

INPUT UNITS ARE ALSO SET TO SI

```
*GET WALLBSOL FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 1.97250000
```

```

**** ANSYS SOLUTION ROUTINE ****
Avg ratio= 1, totalParts=1, thickParts=0, thickPcent= 0

```

USE SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER

DO NOT SAVE ANY RESTART FILES AT ALL

WRITE ALL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF NONE
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE NSOL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE RSOL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE STRS ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE EPEL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE EPTH ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WRITE NLOA ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE MISC ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF LAST
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

CONTACT INFORMATION PRINTOUT LEVEL 1

***** ANSYS SOLVE COMMAND *****

*** NOTE *** CP= 1.156 TIME= 01:58:21
There is no title defined for this analysis.

*** WARNING *** CP= 1.156 TIME= 01:58:21
Element shape checking is currently inactive. Issue SHPP,ON or
SHPP,WARN to reactivate, if desired.

*** NOTE *** CP= 1.266 TIME= 01:58:22
The model data was checked and warning messages were found.
Please review output or errors file (
C:\DOCUME~1\ADMINI~1\LOCALS~1\Temp\file.err) for these warning
messages.

*** SELECTION OF ELEMENT TECHNOLOGIES FOR APPLICABLE ELEMENTS ***
---GIVE SUGGESTIONS ONLY---

ELEMENT TYPE 1 IS SOLID187. IT IS NOT ASSOCIATED WITH FULLY INCOMPRESSIBLE
HYPERELASTIC MATERIALS. NO SUGGESTION IS AVAILABLE.

1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 8.1 *****
ANSYS Multiphysics
00265231 VERSION=INTEL NT 01:58:22 AUG 11, 2008
CP= 1.266

SOLUTION OPTIONS

PROBLEM DIMENSIONALITY.3-D
DEGREES OF FREEDOM. UX UY UZ
ANALYSIS TYPESTATIC (STEADY-STATE)
EQUATION SOLVER OPTION.SPARSE
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIXSYMMETRIC

*** WARNING *** CP= 1.344 TIME= 01:58:22
Material number 2 (used by element 8460) should normally have at least
one MP or one TB type command associated with it. Output of energy by
material may not be available.

*** NOTE *** CP= 1.359 TIME= 01:58:22
Present time 0 is less than or equal to the previous time.
Time will default to 1.

*** NOTE *** CP= 1.422 TIME= 01:58:22
The step data was checked and warning messages were found.
Please review output or errors file (
C:\DOCUME~1\ADMINI~1\LOCALS~1\Temp\file.err) for these warning
messages.

*** NOTE *** CP= 1.422 TIME= 01:58:22
The conditions for direct assembly have been met. No .emat or .erot
files will be produced.

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOAD STEP OPTIONS

```

LOAD STEP NUMBER. . . . . 1
TIME AT END OF THE LOAD STEP. . . . . 1.0000
NUMBER OF SUBSTEPS. . . . . 1
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . . NO
INERTIA LOADS
  ACEL . . . . . 0.0000      -9.8067      0.0000
PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . . NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS
  ITEM      FREQUENCY  COMPONENT
  ALL       NONE
  NSOL      LAST
  RSOL      LAST
  STRS      LAST
  EPEL      LAST
  EPTH      LAST
  NLOA      LAST
  MISC      LAST

```

SOLUTION MONITORING INFO IS WRITTEN TO FILE=
file.mntr

**** CENTER OF MASS, MASS, AND MASS MOMENTS OF INERTIA ****

CALCULATIONS ASSUME ELEMENT MASS AT ELEMENT CENTROID

TOTAL MASS = 612.93

CENTER OF MASS	MOM. OF INERTIA ABOUT ORIGIN	MOM. OF INERTIA ABOUT CENTER OF MASS
XC = -0.75605E-01	IXX = 1012.	IXX = 812.5
YC = 0.43436	IYY = 246.7	IYY = 159.0
ZC = 0.37052	IZZ = 1045.	IZZ = 926.2
	IXY = 66.14	IXY = 46.01
	IYZ = -54.79	IYZ = 43.86
	IZX = 10.00	IZX = -7.169

*** MASS SUMMARY BY ELEMENT TYPE ***

TYPE	MASS
1	612.932

Range of element maximum matrix coefficients in global coordinates
Maximum= 1.03177704E+13 at element 2157.
Minimum= 1.226044879E+09 at element 7922.

*** ELEMENT MATRIX FORMULATION TIMES

TYPE	NUMBER	ENAME	TOTAL CP	AVE CP
1	8459	SOLID187	2.594	0.000307
2	2728	SURF154	0.469	0.000172

Time at end of element matrix formulation CP= 4.15625.

SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER.

Number of equations = 50859, Maximum wavefront = 371

*** NOTE ***

CP= 6.359 TIME= 01:58:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The initial memory allocation (-m) has been exceeded.
 Supplemental memory allocations are being used.
 Memory available for solver = 118.11 MB
 Memory required for in-core = 110.48 MB
 Optimal memory required for out-of-core = 34.42 MB
 Minimum memory required for out-of-core = 31.33 MB

*** ELEMENT RESULT CALCULATION TIMES

TYPE	NUMBER	ENAME	TOTAL CP	AVE CP
1	8459	SOLID187	4.000	0.000473
2	2728	SURF154	0.922	0.000338

*** NODAL LOAD CALCULATION TIMES

TYPE	NUMBER	ENAME	TOTAL CP	AVE CP
1	8459	SOLID187	0.250	0.000030
2	2728	SURF154	0.063	0.000023

*** LOAD STEP 1 SUBSTEP 1 COMPLETED. CUM ITER = 1
 *** TIME = 1.00000 TIME INC = 1.00000 NEW TRIANG MATRIX

*** ANSYS BINARY FILE STATISTICS

BUFFER SIZE USED= 16384
 23.375 MB WRITTEN ON ELEMENT SAVED DATA FILE: file.esav
 22.188 MB WRITTEN ON ASSEMBLED MATRIX FILE: file.full
 22.000 MB WRITTEN ON RESULTS FILE: file.rst

FINISH SOLUTION PROCESSING

***** ROUTINE COMPLETED ***** CP = 14.641

*GET WALLASOL FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 1.97638889
 1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 8.1 *****
 ANSYS Multiphysics
 00265231 VERSION=INTEL NT 01:58:35 AUG 11, 2008
 CP= 14.641

***** ANSYS RESULTS INTERPRETATION (POST1) *****

*** NOTE *** CP= 14.641 TIME= 01:58:35
 Reading results into the database (SET command) will update the current displacement and force boundary conditions in the database with the values from the results file for that load set. Note that any subsequent solutions will use these values unless action is taken to either SAVE the current values or not overwrite them (/EXIT,NOSAVE).

SET PARAMETER DIMENSIONS ON REACTION
 TYPE=ARRA DIMENSIONS= 6 1 1

*GET MAXCSYS FROM CDSY ITEM=NUM MAX VALUE= 6.00000000

PARAMETER MAXCSYS = 7.000000

*IF maxcsys (= 7.00000) LT
 11 (= 11.0000) THEN

PARAMETER MAXCSYS = 11.00000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

|-----|
|-----|
|-----|
| CP Time      (sec)
| 17.156      Time = 01:58:39      |
| Elapsed Time (sec)
| 20.000      Date = 08/11/2008    |
|-----|
|*-----|
|*-----|

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst above it. The emblem is flanked by two traditional Thai stupas. The entire design is surrounded by a circular border containing the university's name in Thai script: "มหาวิทยาลัยราชภัฏบรัง" (Rajabhat Buriram) at the top and "พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (Kajonrajavidyalaya University) at the bottom.

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Program & Digest



ICCAS 2008

International Conference on
Control, Automation and Systems

October 14(Tue.) - 17(Fri.), 2008
COEX, Seoul, Korea



Institute of Control, Robotics and Systems
in conjunction with KRC 2008

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Application of Finite Element to Analyze the Accuracy for Radar System

Nareerat Boonsung¹ and Prapart Ukakimapan²

¹ Department of Instrumentation Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(Tel : +66-2-326-1383; E-mail: Nareerat.Boonsung@Emerson.com)

² Department of Instrumentation Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(Tel : +66-2-739-2470; E-mail: kuprapart@kmitl.ac.th)

Abstract: Radar is one choice for level measurement in petrochemicals industry with high degree of accuracy. The radar provides a non-contact sensor that is virtually unaffected by change in process temperature, pressure or the gas vapor composition within a vessel. The measurement accuracy is unaffected by change in density, conductivity and dielectric constant of product being measure or by air movement above the product. These benefit have become more significant to the process industry since the advent of Radar owing to low maintenance cost as there are no moving part. This is the reason Radar are so popular for industrial applications presently. However we found that some measurement value deviates from the actual level after the Radar is in operation for few years. We have used Finite Element Technique to investigate for deviation, as our case study.

Keywords: Electromagnetic Wave, Radar Level Measurement, Finite Element

1. INTRODUCTION

At present the Radar Level Measurement is a popular level measurement technique in petrochemical industry, with high degree of accuracy and virtually unaffected by change in process parameters like temperature, pressure, density or the gas vapor. Due to non-contact sensor, there is no moving part and therefore maintenance costs are low. With lots of installation in industry, we found deviation of reading after few years in service, as a general phenomenon. In our research, we have taken this, as a case study. For example, suppose the operator control level at 65% of tank level. After one year of operation, we found that there is some deviation in reading from the actual level, though there is no change in process or any damage of Radar. We assumed the deviation was a result of shifting of datum line of fluid. We have used Finite Element Technique to prove this assumption.

2. ELECTROMAGNETIC WAVE PRINCIPLE

The Radar is base on Electromagnetic wave or Radio wave principle by James Clerk Maxwell. He predicted the existence of radio wave in his theory of electromagnetism as long ago as 1864. He showed mathematically that all electromagnetic wave travel at the constant velocity in free space, independent of their wavelength. This velocity is of the order of 300,000 Km/Sec, the speed of light. Hertz confirmed that these electromagnetic radio waves have same velocity as light and could be reflected by metallic and dielectric bodies. Maxwell showed that the velocity of light in vacuum in free space is give by the expression:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{(\mu_0 \times \epsilon_0)}}$$

c_0 velocity of electromagnetic wave in a vacuum in metres / second

μ_0 the permeability of free space ($4\pi \times 10^{-7}$ henry / metre)

ϵ_0 the permittivity of free space (8.854×10^{-12} farad / metre)

(1)

2.1 Relative Permittivity or dielectric constant

The ratio of the permittivity of the media to the permittivity of free space is a dimensionless property called "relative permittivity" or "dielectric constant". The value of the dielectric constant of the product being measure is very important for Radar application in level measurement. In non-conductive product, some of the microwave energy will pass through the product and the rest will be reflected off the surface.

2.2 Permeability and relative permeability

The Magnetic vector B, of an electromagnetic wave also has an influence on the velocity of electromagnetic wave. However, this influence is degasses and vapors which are non-magnetic. The relative permeability of the product being measure has no significant effect on the reflected signal when compare with the effect of the relative of permittivity or dielectric constant. For the non-magnetic gases above the product being measured, the value of the relative permeability, $M = 1$

2.3 Frequency, Velocity and Wavelength

The Frequency remains uninfluenced by changes in the propagation media. However, the velocity and wave length change depending on the electric properties of the medium in which they are traveling. The speed of propagation can be calculated with equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำออกจำหน่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{(\mu_r \times \epsilon_r)}}$$

- C velocity of electromagnetic wave in the medium in metres/second
 C₀ velocity of electromagnetic waves in free space
 μ_r the relative permeability (μ medium / μ₀)
 ε_r the relative permittivity (2)

Change in the wavelength and velocity of microwave are apparent in certain radar level application. Change in temperature, pressure and gas composition have a small effect on the running time of microwave because the dielectric constant of the propagation medium is altered to a greater or lesser extent. The dielectric constant or relative permittivity can be calculate as follow

$$\epsilon_r = 1 + (\epsilon_{IN} - 1) \times \frac{\theta_N \times P}{\theta \times P_N}$$

- ε_r calculated dielectric constant (relative permittivity)
 ε_{IN} dielectric constant of gas/vapour under normal conditions (temperature 273 K, pressure 1 bar absolute)
 θ_N temperature under normal conditions, 273 Kelvin
 P_N pressure under normal conditions, 1 bar absolute
 θ process temperature in Kelvin
 P process pressure in bar absolute (3)

2.4 Electromagnetic waves exhibit the same property as light

- Reflection : immediately direction changing of wave when traveling and reflection with medium same as miller reflection
- Polarization : Define the orientation of the electromagnetic wave and reflect to the direction of the electric vector E
- Refraction : when the electromagnetic wave traveling though to the difference medium with difference electric property let some of wave can go though
- Interference : The mixing of signal that are out of phase. The microwave signal have sinusoidal wave form. Interference can be "constructive" where in phase signal produce a signal with a higher amplitude or it can be destructive when signal that are 180 out of phase effectively cancel each other out

3.1 Finite Element In cause studies to investigation Concept

Our case study for investigation:

The operator control Lactic Acid level at 65% of tank, by Radar Level technique. The tank height is 2.8 m. as show as Fig.1

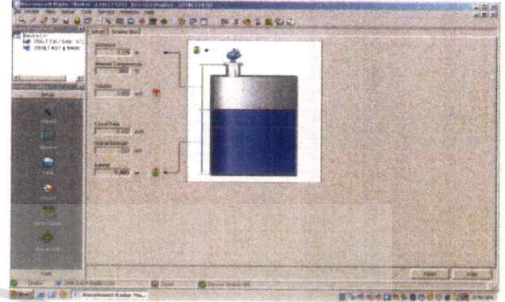


Fig. 1 The Radar control the level at 65% set point

Nearly after one year of commissioning, the output signal show the control level has fluctuated and returned to set point again for two times as shown in Fig.2

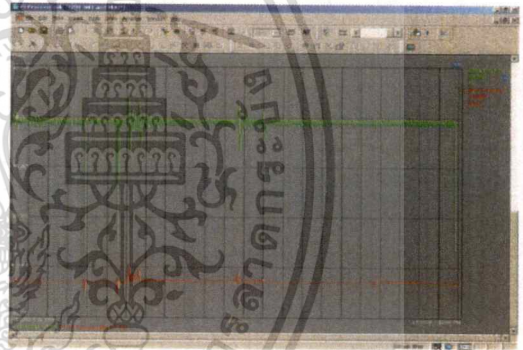


Fig. 2 The out put signal fluctuation.

After two days, the DCS got alarm "burn out high" The operator requested maintenance, to check up the device. When maintenance checked, they found level switch was not working as the actual liquid level has not reached there. Maintenance tried to re-configure Radar, but it was still showing the same fault. Also there was no damage to Radar. (This was proved by maintenance, by showing the same Radar was working well in another area.)

We have grouped the problem in two parts:

1. Relationship between radar and fluid property
2. Structure or Vessel

As Radar was working OK for more than one year before showing error in reading and there was no change in process or any damage to Radar, we concluded there was no effect from the fluid property.

So, in this research, we assumed that in this case, error was due to deviation in radar wave direction. To

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. FINITE ELEMENT INVESTIGATION ERROR OF READING

confirm futher, we used same Radar in another area and found that it was working perfectly & readings are accurate. The same is clearly visible in Fig.3

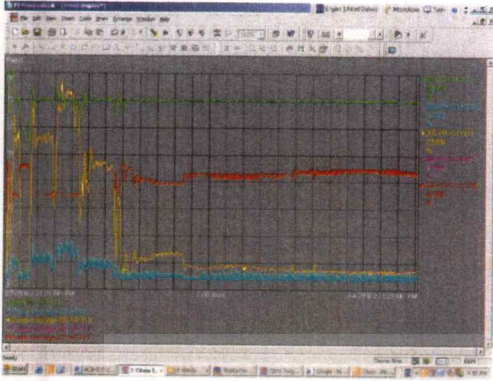


Fig. 3 The out put signal after change installing Radar at new location.

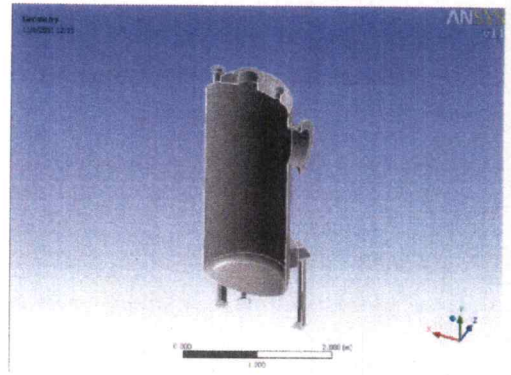


Fig. 5 The Geometry drawing

Step2. Apply mesh to the object to start analysis show as Fig 6

To support our assumption, we have also proved this analysis by Finite Element Technique.

3.2 Finite Element Experiment

Fig.4 show the vessel drawing to be analyzed for structure part in support of our assumption of Finite Element Technique with ANSYS program

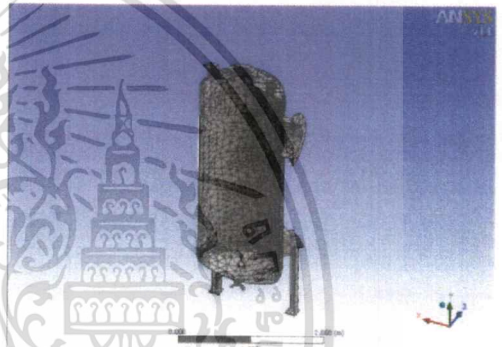


Fig. 6 Drawing the Geometry after apply mesh

Step3. input for all process data to be analysis show as Fig 7 and Fig.8

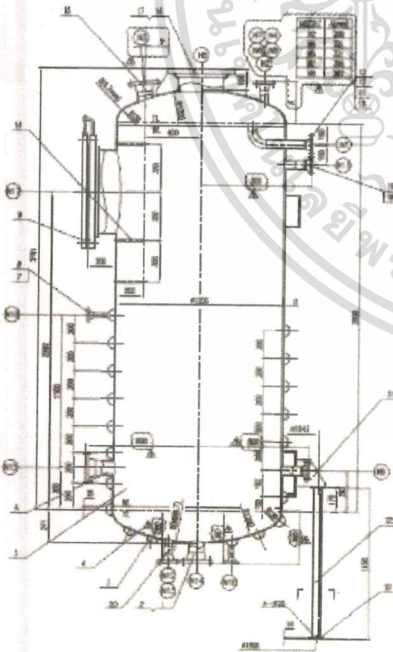


Fig. 4 The Vessel Drawing

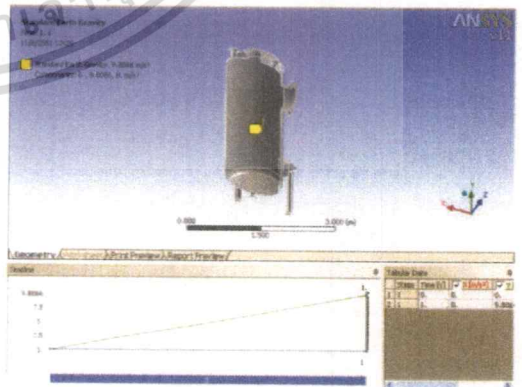


Fig. 7 Environment 1

Step1. Drawing the Geometry follow with the same as Vessel Drawing dimension show as Fig 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

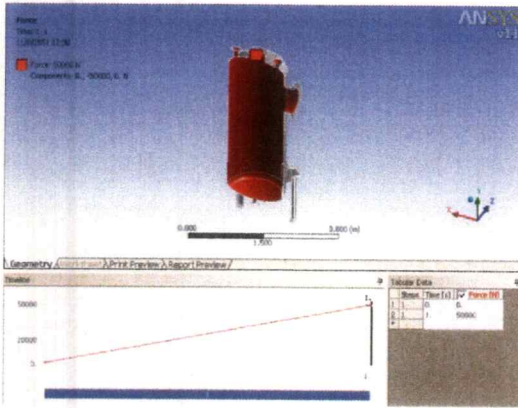


Fig. 8 Environment 2

When we had run the analysis the result show as Fig.9_A to Fig.9_E There were impact of stress on the vessel and its support. The result shows that Vessel & its support has got stressed & deformed, when energy or load came from the vessel weight and fluid weight, combined with the environmental change after few years of operation.

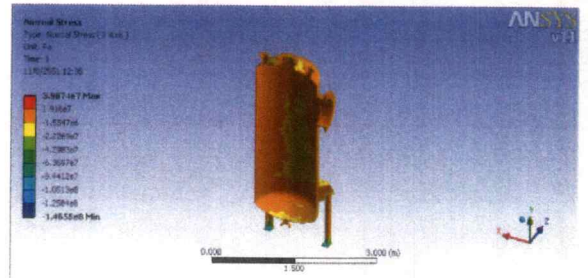


Fig.9_D Normal Stress

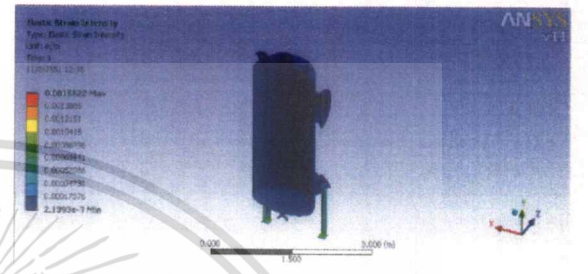


Fig.9_E Elastic Strain Intensity

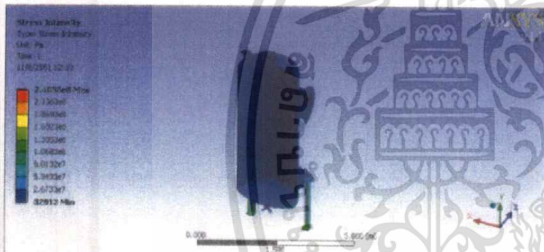


Fig.9_A Stress Intensity

Again the nozzle, in which the Radar was installed, was designed very close to the limits prescribed for mounting of the Radar.

All the above reasons have directly affected the deformation of vessel & its support. So, when the structure of vessel was deformed the radar wave direction has deviated from the correct point and it started showing error in reading of correct level.

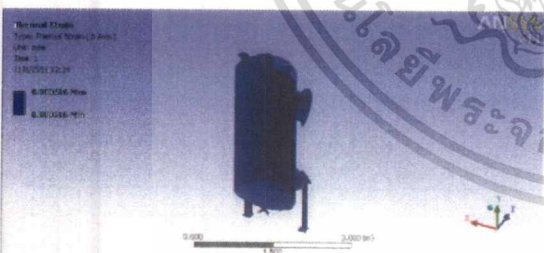


Fig.9_B Thermal Strain

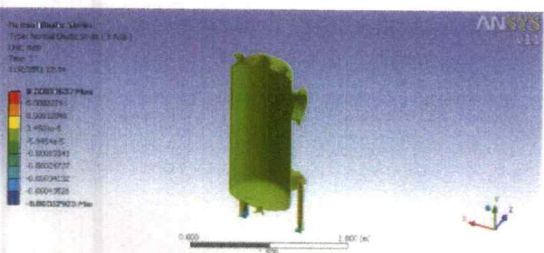


Fig.9_C Normal Elastic Strain

REFERENCES

- [1] Adams, S & Allday, J. 2000. **Advanced Physics**. Oxford: Oxford University.
- [2] Cutnell, J.D. & Johnson, K.W. 2001. **Physics**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
- [3] Serway, R.A. & Beichner, R.J. 2000. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics** 5th ed. Orlando:Harcourt College.
- [4] Serway, R.A. & Jewett, J.W. 2004 **Physics for Scientists and Engineers** 6th ed. Belmont:Brooks/Cole-Thomson Learning.
- [5] Walk, J.S. 2004 **Physics** 2nd ed. New Jersey: Pearson Education.
- [6] Wilson, J.D. & Buffa ,A.J. 2003 **College Physics with Modern Physics**. 10th ed. San Francisco : Addison Wesley Longman
- [7] Peter Devine ,**Radar Level Measurement the user guide**
- [8] William H.Hayt,JR **Engineering Electromagnetic** (Fifth Edition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] **Pramote Dachaaumphai Finite Element in Engineering Work**
- [10] **Pramote Dachaaumphai Easy Finite Element**
- [11] **Ernest O.Doebelin Measurement System Application and Design (Fourth Edition)**
- [12] **Sonntag Borgnakke Van Wylen Fundamentals of Thermodynamics (Fifth Edition)**
- [13] **Instrument Engineering Handbook**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อนามสกุล	นางสาวนารีรัตน์ บุญสูง
วัน เดือน ปีเกิด	19 กุมภาพันธ์ 2521 กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	100/110 ม.7 แขวง ลำปลาทิว เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปัจจุบัน	วิศวกรขายอวูโส บริษัท อีเมอส์(ประเทศไทย)จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้