

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า

SIMULATION AIR FLOW IN ELECTRIC OVEN



T119374



นาย จารุวัฒน์ มัดจูปะ
นาย นกนัต ลิทธิเสรีประทีป
นาย ปรีชาพล โพธิ์ศิริ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119374.....
วัน,เดือน,ปี.....- 7 S.A. 2554.....

b. 19/666/69
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า
SIMULATION AIR FLOW IN ELECTRIC OVEN

โดย

นาย จารวัฒน์ มัดจูปะ

นาย นกนธ์ สิทธีเสรีประทีป

นาย ปรีชาพล โพธิ์ศิริ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า

SIMULATION AIR FLOW IN ELECTRIC OVEN

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| 1. นาย จารุวัฒน์ มัคจุปะ | รหัสนักศึกษา 50010216 |
| 2. นาย นกนต์ สิทธิเสรีประทีป | รหัสนักศึกษา 50010745 |
| 3. นาย ปรีชาพล โพธิ์ศิริ | รหัสนักศึกษา 50010931 |



(Signature)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.ชินรัชย์ เขียวพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า

นายจรรวัฒน์ มัจจุปะ 50010216
 นายณนต์ สิทธิเสรีประทีป 50010745
 นายปรีชาพล โพธิ์ศิริ 50010931
 รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษารูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า ในประเด็นของทิศทางความเร็ว รวมทั้งการวิเคราะห์การกระจายของอากาศที่อยู่ภายในเตาอบไฟฟ้า โดยการกระจายตัวของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้านี้จะบอกถึงความสามารถในการพาความร้อนจากขดลวดร้อนว่ามีกระจายความร้อนได้ทั่วทั้งเตาอบหรือไม่ ในประเด็นของการจำลองอากาศจะใช้โปรแกรมจำลองการไหลฟลูเอนต์ (FLUENT) คำนวณค่าความเร็วและทิศทางของอากาศที่ไหลอยู่ภายในเตาอบ โดยมีการสร้างโดเมนของอากาศ และแบ่งโดเมนเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จากนั้นได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต กำหนดค่าความเร็วลมที่เข้ามาภายในเตาอบ ซึ่งค่าดังกล่าวมาจากการวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ผลการจำลองที่ได้พบว่าค่าความเร็วและทิศทางของการไหลของเตาอบไฟฟ้าก่อนการปรับปรุงที่คำนวณได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมฟลูเอนต์เปรียบเทียบกับค่าการวัดความเร็วและการตรวจสอบทิศทางลมด้วยวิธีการทดลองบริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบมีความสอดคล้องกัน จากนั้นได้ทำการปรับปรุงการไหลของอากาศ โดยทำการปรับปรุงการกระจายของอากาศ 3 รูปแบบ ผลจากการจำลองผลพบว่า ผลก่อนการปรับปรุงมีการกระจายตัวของอากาศดีที่สุดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION AIR FLOW IN ELECTRIC OVEN

Jaruwat	Madjupa	50010216
Napon	Sittisareeprateep	50010745
Preechapol	Poesiri	50010931
Assc.Prof. Dr.Chinaruk Thianpong		Advisor

ABSTRACT

The purpose of this project is to study air flow inside the electric oven. In this research air was investigated by simulation technique which direction, distribution and velocity of air were studied. Air flow distribution could describe performance convection heat transfer inside an electric oven. The simulation of air used ANSYS FLUENT calculate direction and velocity of air flow inside it after create domain and build mesh. Then create boundary condition each components: velocity in and outflow inside the oven. The magnitude of velocity measured by anemometer. The simulated before modified results will be compared with the measurement of velocity distribution and simulation at the bottom layer found value are consistent. Then adjusted the air flow, simulated same process before modified are 3 cases. The results between adjusted 3 cases and before modified are air flow of before modified have the best performance and distribution.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก รศ.ดร.ชินรักษ์ เขียวพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และนายวิวัฒน์ ภูเจริญ เจ้าหน้าที่สำนักบริการคอมพิวเตอร์ที่ให้คำปรึกษาการใช้โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง รวมทั้งความรู้ทางด้านฟิสิกส์ ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.มนศักดิ์ พิมสาร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ฝั่งพล ที่ทีมงานจากชมชุงทุกคน ในการที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่กี้ พี่แอ๊ะ และพี่เอฟ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ รวมถึงให้คำปรึกษาในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายจรรูวัฒน์ มัจจุปะ
 นายภนต์ สิทธิเสรีประทีป
 นายปรีชาพล โพธิ์ศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของของไหล	
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD	4
2.1.1 กฎการอนุรักษ์ในการเคลื่อนที่ของของไหล	4
2.1.2 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน	4
2.1.3 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ	6
2.1.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลในเทอมของชิ้นส่วนย่อยของไหล	9
2.1.5 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ	12
2.1.6 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ	16
2.1.7 สมการสถานะ	23
2.1.8 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน	24
2.1.9 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 แบบจำลอง $k - \varepsilon$	30
2.2.1 Standard $k - \varepsilon$ Model	30
2.2.1.1 ภาพรวม	30
2.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$	30
2.2.1.3 การจำลองความหนืดปั่นป่วน	31
2.2.1.4 ค่าคงที่แบบจำลอง	31
2.2.2 RNG $k - \varepsilon$ Model	32
2.2.2.1 ภาพรวม	32
2.2.2.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$	32
2.2.2.3 จำลองผลกระทบเนื่องจากความหนืด	33
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเตาอบไฟฟ้า	35
3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ	37
3.2.1 การเขียน CAD ของเตาอบไฟฟ้า	37
3.2.2 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเตาอบไฟฟ้า	38
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล	38
3.2.4 การจำลองการไหลในโปรแกรม ANSYS FLUENT	40
3.2.5 การกำหนดปัญหาที่ใช้ในการจำลอง	41
3.2.6 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของอากาศ	42
3.3 การทดลองเทียบกับผลจากการจำลองที่ได้จากโปรแกรม	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการจำลองการไหลของอากาศแบบดั้งเดิม	53
4.2 ผลการทดสอบจากการวัดค่าความเร็วลมและทิศทางการกระจายลมจริง	58
4.3 ผลการจำลองการปรับปรุงรูปแบบการไหลของอากาศ	61
4.3.1 ปรับปรุงรูปแบบที่ 1	61
4.3.2 ปรับปรุงรูปแบบที่ 2	66
4.3.3 ปรับปรุงรูปแบบที่ 3	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	76
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้	29
3.1 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเตาอบ SAMSUNG รุ่น BF62CBST	35
3.2 แสดงค่าคงที่ C ในสมการ $k - \epsilon$	44
4.1 แสดงการวัดค่าความเร็วลม เปรียบเทียบค่ากันระหว่างค่าจากการทดสอบ และค่าจากการคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบทั้ง 25 จุด	58



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	7
2.3	13
2.4	13
2.5	18
3.1	35
3.2	36
3.3	36
3.4	37
3.5	37
3.6	38
3.7	39
3.8	40
3.9	41
3.10	44
3.11	45
3.12	45
3.13	46
3.14	46
3.15	47
3.16	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงเครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิตอล (Anemometer)	49
3.18 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลมบริเวณระนาบพื้นล่างของเตาอบ	49
3.19 แสดงอุปกรณ์ทดลองหาแนวโน้มทิศทางการไหลของอากาศ	50
3.20 แสดงหน้าฉากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ แบบดั้งเดิม	51
3.21 แสดงหน้าฉากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 1	51
3.22 แสดงหน้าฉากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 2	52
3.23 แสดงหน้าฉากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 3	52
4.1 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบ ไฟฟ้าแบบดั้งเดิม	53
4.2 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิมที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบ ไฟฟ้า	54
4.3 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิมที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบ ไฟฟ้า	54
4.4 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิมที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	55
4.5 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	55
4.6 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	56
4.7 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	56
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมระหว่างการทดสอบ และการคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณพื้นล่างของเตาอบทั้ง 25 จุด ตามรูปที่ 3.17	59
4.9 แสดงการทดลองหาแนวโน้มทิศทางการไหลของอากาศในเตาอบ	59
4.10 ภาพแสดงทิศทางการไหลของอากาศจากการทดสอบ บริเวณพื้นล่างของเตาอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ	60
4.11 แสดงความแตกต่างหน้าฉากของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศรูปแบบที่ 1	61
4.12 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 1	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	62
4.14 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	63
4.15 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	63
4.16 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	64
4.17 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	64
4.18 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	65
4.19 แสดงความแตกต่างหน้าฉากของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศ	
รูปแบบที่ 2	66
4.20 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 2	66
4.21 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	67
4.22 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	67
4.23 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	68
4.24 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	68
4.25 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	69
4.26 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	69
4.27 แสดงความแตกต่างหน้าฉากของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศ	
รูปแบบที่ 3	70
4.28 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 3	71
4.29 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	71
4.30 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า	72
4.31 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	72
4.32 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.33	แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	73
4.34	แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องในทุกวินาทีส่งผลให้มีเครื่องอำนวยความสะดวกต่าง ๆ รอบตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องใช้ไฟฟ้ามีผลกระทบต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากซึ่งส่งผลให้ผู้ผลิตมีการพัฒนาสินค้าของตนให้ดียิ่งขึ้นทั้งในด้านการประหยัดพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพ รวมทั้งการเพิ่มฟังก์ชันใหม่ ๆ ของเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งวิธีการหนึ่งของผู้ผลิตที่ใช้ในการพัฒนา และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ คือ การสร้างแบบจำลอง (Simulation) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยนำผลที่ได้จากการจำลองมาทำการวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามหลักทางทฤษฎี โดยข้อดีของการสร้างแบบจำลอง คือ ช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อนที่จะผลิตจริงโดยผลการจำลองสามารถบอกถึงชนิดของวัสดุที่ควรใช้ ผลกระทบจากการใช้วัสดุต่าง ๆ และแนวโน้มลักษณะทางกายภาพที่อาจจะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีผู้ศึกษาทำการจำลองต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเตาอบไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

Verboven, P., N. Scheerlinck และคณะ (2000) [5] ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในเตาอบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม CFD ซึ่งใช้การคำนวณด้วยสมการ $k - \epsilon$ ซึ่งผลการจำลองเมื่อเทียบกับการทดลองพบว่า ค่าความเร็วลมมีความคลาดเคลื่อน โดยเฉลี่ยอยู่ 22% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของการไหลแบบปั่นป่วน และความหนาแน่นกริดที่ใช้ในการคำนวณ โดยระเบียบวิธีทางตัวเลข

Mistry, H., s. Ganapathi และคณะ (2006) [6] ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการใช้โปรแกรม CFD โดยใช้พื้นฐานทางฟิสิกส์มารับ ซึ่งแบบจำลองได้ถูกพัฒนาโดยมีการทดลองที่แม่นยำมาสนับสนุน โดยเมื่อเทียบกับการทดลองแบบจำลองนี้ได้แสดงถึงความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% สำหรับวัฏจักรแบบทรานเซียนต์ (Transient) นี้

Curcio, S., M. Aversa และคณะ (2008) [7] การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์แบบจำลองทางทฤษฎีในการที่จะบอกถึงการถ่ายเทโมเมนตัมความร้อน และมวลที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันในการที่เป็นตัวขับเคลื่อนการพาอากาศแห้งร้อน ภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนรอบ ๆ อาหารตัวอย่าง ซึ่งจากการศึกษาภายใต้สภาวะที่กำหนดพบว่าระหว่างการทำงานจากแบบจำลอง และผลที่วัด ได้จริงมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก

Smolka, J., A. J. Nowak และคณะ [8] งานวิจัยนี้ได้พิจารณาโดยใช้วิธีการทดลองให้มีความสมเหตุสมผลกับการใช้โปรแกรม CFD ในการจำลองแบบสามมิติของการไหล และกระบวนการทางความร้อนในเตาอบโดยการหมุนวนของอากาศแบบบังคับ ซึ่งผลที่ได้ คือ รูปแบบของอุณหภูมิถูกทำให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบของตัวต้นแบบที่ได้ทำการปรับปรุง

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แบบจำลอง CFD มีความคลาดเคลื่อนน้อย ซึ่งผู้จัดทำจึงได้ใช้โปรแกรม CFD ในการสร้างแบบจำลอง โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองพฤติกรรมของอากาศที่ไหลภายในเตาอบไฟฟ้า ซึ่งจะวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเตาอบว่ามีจุดใดที่เป็นจุดที่อากาศผ่านได้ไม่ทั่วถึงรวมทั้งการวิเคราะห์ความเร็วของลมที่ความเร็วค่าต่าง ๆ ว่าค่าของความเร็วเท่าใดจึงจะเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้โปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) และ ฟลูเอนท์ (FLUENT)
2. ศึกษาและทำการจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า
3. นำผลการจำลองการไหลของอากาศมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
4. ทำการจำลองการปรับปรุงการไหลของอากาศ เพื่อให้มีการกระจายตัวของอากาศดีขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า เพื่อนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง รวมทั้งการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศ เพื่อให้มีการกระจายตัวของอากาศดีขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำการจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องสอดคล้อง ตามผลการทดลองจริง
2. ใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมได้
3. สามารถนำผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมมาต่อยอดและพัฒนาต่อไปได้
4. สามารถใช้ผลจากการจำลองทำการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของของไหล

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทาง CFD [1,9]

2.1.1 กฎการอนุรักษ์ในการเคลื่อนที่ของของไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ประกอบด้วยกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สิ่งนี้ได้นำไปสู่สมการควบคุมของการไหลรวมทั้งเงื่อนไขที่จำเป็น คือ เงื่อนไขเริ่มต้นและที่ขอบ เนื้อหาหลักที่ครอบคลุมในบทนี้ประกอบด้วย

- ระบบสมการ PDEs (Partial Differential Equations) ซึ่งควบคุมการไหลในพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y, z)
- สมการสถานะ
- แนวคิดเกี่ยวกับความหนืดในรูปของ Newtonian ซึ่งนำไปสู่สมการ Navier – Stokes
- ความเหมือนกันในเชิงหลักการระหว่างสมการ PDEs ของการไหล กับสมการการเคลื่อนย้าย (Transport Equations)

2.1.2 สมการควบคุมของการไหลและการถ่ายเทความร้อน

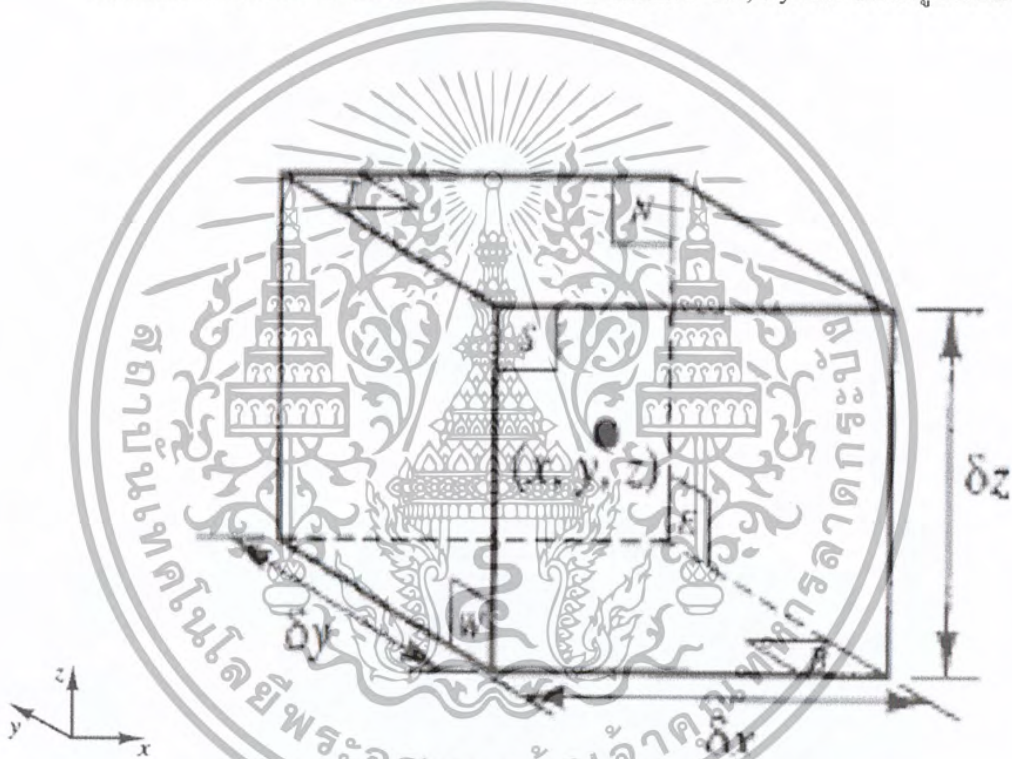
สมการควบคุมของการไหลของของไหลแทนถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหายไปไหน
- อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล (กฎข้อที่สองของนิวตัน)
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน กับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล (กฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือ พิจารณาที่สเกลระดับ 1 ไมโครเมตร (μm) ขึ้นไป โครงสร้าง และการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลจึงไม่นำมาพิจารณา โดยสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมของคุณสมบัติในระดัมหภาค เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเหล่านี้ เป็นต้น สิ่งนี้อาจจะคิดเป็นค่าเฉลี่ยของกลุ่มโมเลกุลจำนวนมาก ดังนั้นจุดใด ๆ ในของไหลนั้นจะมีคุณสมบัติของของไหลในระดัมหภาค ไม่ขึ้นกับอิทธิพลจากอนุภาคในระดับโมเลกุล

พิจารณาชิ้นส่วนของไหลขนาดเล็กที่มีความยาวด้านเท่ากับ δx , δy และ δz ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนของของไหลสำหรับกฎการอนุรักษ์ [10]

ผิวหน้าทั้งหกด้านจะถูกแทนด้วย N , S , E , W , T , B ซึ่งแทนถึงทิศทางในแนวเหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก บน และล่าง ตามลำดับ ศูนย์กลางของชิ้นส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบของมวล โมเมนตัม และพลังงานของชิ้นส่วนของไหล จะสามารถสร้างสมการไหลของของไหลได้

คุณสมบัติของของไหลทั้งหมดจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลา ดังนั้นเราจำเป็นต้องเขียน $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ และ $U(x, y, z, t)$ สำหรับความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิและเวกเตอร์ความเร็ว ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนในการเขียนค่าสัญลักษณ์แสดงคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งจะไม่ระบุตำแหน่ง และเวลา เช่น ความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ของชิ้นส่วนของไหลที่เวลา t จะถูกแทนโดย p หรือการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง x ของความดันที่ศูนย์กลาง (x, y, z) ที่เวลา t หนึ่งๆ จะถูกแทนโดย $\frac{\partial p}{\partial x}$ หลักการนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับคุณสมบัติของไหลทั้งหมด

ชิ้นส่วนของไหลที่พิจารณานั้นมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งคุณสมบัติของไหลที่ผิวหน้าสามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยสองพจน์แรกของสมการ Taylor ดังนั้น สำหรับตัวอย่างความดันที่ผิวหน้า e และ w ซึ่งทั้งคู่มีระยะห่างจากศูนย์กลางของชิ้นส่วนของไหลเท่ากับ $\frac{1}{2} \partial x$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \partial x \quad \text{และ} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \partial x$$

2.1.3 การอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุรักษ์มวลคือ การพิจารณาถึงสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลใน} &= \text{อัตราการไหลสุทธิของมวล} \\ \text{ชิ้นส่วนของไหล} & \text{ที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล} \end{aligned}$$

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหลคือ

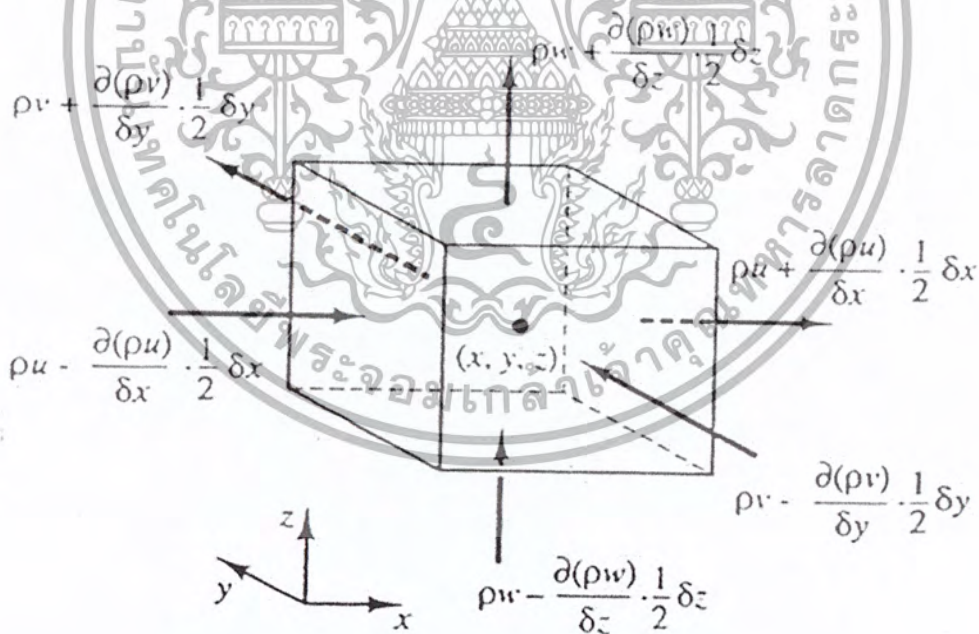
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปหาอัตราการไหลโดยมวลผ่านพื้นผิว และชิ้นส่วนย่อย ซึ่งถูกให้โดยผลคูณของความหนาแน่น พื้นที่ และความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 2.2 พบว่าการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยผ่านพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 2.2 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนของไหล [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกัน เมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย $\delta x \delta y \delta z$ ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

หรือในรูปแบบของเทนเซอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (2.4)$$

สมการ 2.4 นี้ คือสมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัว และอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็ก ๆ นั้น ซึ่งเรียกว่าเป็นเทอมของการพา

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (เช่น ของเหลว) ความหนาแน่นมีค่าคงที่ และสมการที่ 2.4 จะได้เป็น

$$\text{div}(U) = 0 \quad (2.5)$$

หรือในรูปแบบเต็ม

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

2.1.4 อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล ในเทอมของชั้นส่วนย่อยของไหล

ในกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานนั้น จะมีการกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างของของไหลจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x, y, z) ของของไหลและเวลา (t) ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ค่าคุณสมบัติใด ๆ ต่อหน่วยมวล ด้วยสัญลักษณ์ ϕ โดยการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ เทียบกับเวลาของอนุภาคของไหล $\frac{D\phi}{Dt}$ คือ

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

โดยที่ $\frac{dx}{dt} = u$, $\frac{dy}{dt} = v$ และ $\frac{dz}{dt} = w$ นำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการข้างบน จะได้

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + U \text{grad}\phi \quad (2.7)$$

$\frac{D\phi}{Dt}$ เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุรักษ์มวล ซึ่งสนใจที่จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตรอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น ρ เข้าไปกับเทอม $\frac{D\phi}{Dt}$ ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \text{grad}\phi \right) \quad (2.8)$$

รูปแบบนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของของไหล ในปริมาตรเล็ก ๆ ที่หยุดนิ่งหนึ่ง ๆ เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง: 1) อนุพันธ์ของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล กับ 2) อัตราเปลี่ยนแปลง และการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ในชิ้นส่วนหรือในปริมาตรย่อย ๆ ของของไหลนั้น

ต่อไปหากพิจารณาการอนุรักษ์ของมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร (ในที่นี้คือ ความหนาแน่น ρ) เป็นพารามิเตอร์ที่กำลังศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของ: 1) อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็ก ๆ และ 2) ผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล (2.4) คือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U)$$

ดังนั้นรูปทั่วไปของเทอมทั้งสองเทอมนี้ สำหรับคุณสมบัติใด ๆ ของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) \quad (2.9)$$

สมการที่ 2.9 เทอมแรก คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับเทอมที่สอง คือ การไหลสุทธิต่อหน่วยปริมาตรของ ϕ ที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยในโดเมนของของไหล ซึ่งเราสามารถนำมาเขียนใหม่เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + U \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (2.10)$$

เทอม $\frac{\partial \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho U)$ เท่ากับศูนย์ เนื่องจากกฎอนุรักษ์มวล (2.4) จากความสัมพันธ์ดังแสดงใน (2.10) จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ในชั้นส่วนย่อยของไหล	+ อัตราการไหลสุทธิของปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ ϕ ที่ออกจากชั้นส่วนย่อยของไหล	= อัตราการเพิ่มของคุณสมบัติ ϕ ของของไหล
---	---	--

การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลทั้ง 3 ทิศทาง อังอิงแกนในพิกัดฉาก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์นั้น สามารถแทนพารามิเตอร์ ϕ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมันต่อหน่วยปริมาตร สามารถแสดงได้ดังในตารางข้างล่างนี้

x-momentum	u	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U)$
y-momentum	v	$\rho \frac{Dv}{Dt}$	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U)$
z-momentum	w	$\rho \frac{Dw}{Dt}$	$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U)$
Energy	E	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E U)$

รูปแบบที่ให้ไว้ในตารางข้างบนนี้จะนำไปใช้ในการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัม และพลังงานดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดจากนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 สมการโมเมนตัมแบบ 3 มิติ

กฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหล เท่ากับ ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัม = ผลรวมแรงที่กระทำ
ของอนุภาคของไหล ต่ออนุภาคของไหล

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหลในทิศ x, y, z กำหนดโดย

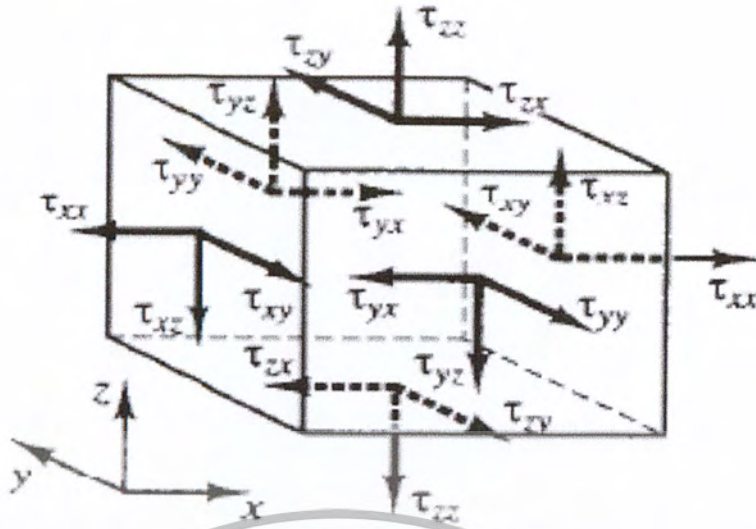
$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (2.11)$$

เราแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหลเป็นสองแบบ คือ

- แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความเค้นเฉือน เป็นต้น
- แรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงหมุนหนีศูนย์กลาง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า Coriolis Force เป็นต้น

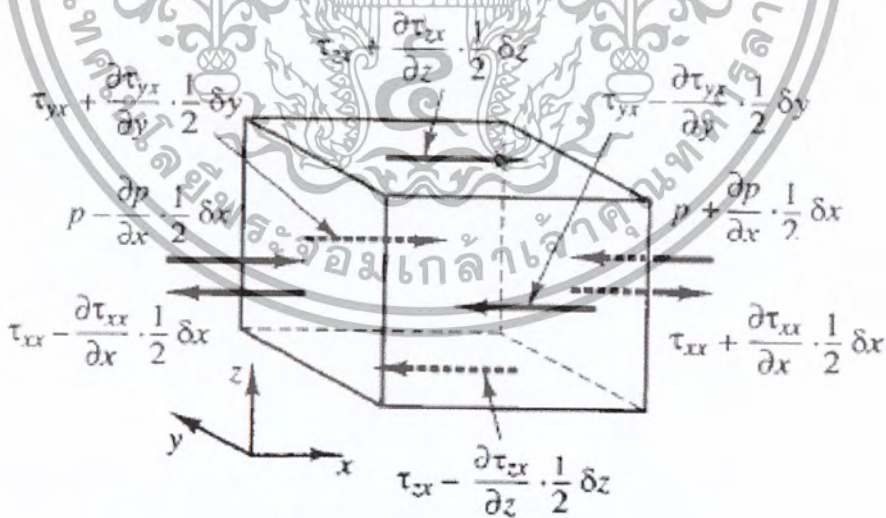
โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหาก และเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรจะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่ม และผลโมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง

ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของของไหล สามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดัน และเทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด μ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉาก ถูกแทนด้วย p ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย τ สัญลักษณ์ τ_{ij} ถูกประยุกต์ใช้เพื่อชี้ให้เห็นถึงทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืด ตัวห้อย i และ j ใน τ_{ij} ชี้ให้เห็นถึงความเค้นย่อย ที่กระทำในทิศทาง j บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง i นั่นเอง



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนของไหล [2]

เริ่มแรกพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xx} ดังในรูปที่ 2.4 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ที่มีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง x คือ ผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x [2]

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่ E, W เราได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\
& + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\
& = \left(- \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z
\end{aligned} \tag{2.12a}$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า N, S ได้ว่า

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \tag{2.12b}$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้า T, B ได้ว่า

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \tag{2.12c}$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้า จะเท่ากับผลรวมของ (2.12a), (2.12b) และ (2.12c) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมที่ปรากฏ ใน (2.13) นี้ ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัม ในหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง x

ขั้นตอนนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง x หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยน โมเมนตัมในทิศทาง x และอนุภาคการไหล (2.11) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง x ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของไหลโดยความดันที่ผิว บวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.14a)$$

ในทำนองเดียวกันโมเมนตัมในทิศทาง y จะเขียนได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.14b)$$

และโมเมนตัมในทิศทาง z คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.14c)$$

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive Normal Stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในกรณีที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile Normal Stress) จะมีเครื่องหมายบวก

เทอมของการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัม $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = 0$ และ $S_{Mz} = 0$ (2.14 a-c) คือ แรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่น แรงกระทำภายในเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะถูกกำหนดให้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0 \text{ และ } S_{Mz} = -\rho g$$

2.1.6 สมการพลังงานในระบบ 3 มิติ

สมการพลังงานหาได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับ อัตราการเพิ่มความดันแก่นุภาคบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของของไหลต่อหน่วยปริมาตร คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (2.15)$$

งานที่กระทำโดยแรงบนพื้นผิว อัตราการเกิดงานบนพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลคูณของแรงและความเร็วในทิศทางของแรง สำหรับแรงตามที่แสดงใน (2.12a–c) เฉพาะที่กระทำในทิศทาง x จะเกิดงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} & \left[\left(pu - \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} u - \frac{\partial(\tau_{xx} u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \right. \\ & \left. \left(pu + \frac{\partial(pu)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} u + \frac{\partial(\tau_{xx} u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{yx} u - \frac{\partial(\tau_{yx} u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \left(\tau_{yx} u - \frac{\partial(\tau_{yx} u)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \right] \delta x \delta z \\ & + \left[- \left(\tau_{zx} u - \frac{\partial(\tau_{zx} u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \left(\tau_{zx} u - \frac{\partial(\tau_{zx} u)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \right] \delta x \delta y \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อลดรูปแล้ว อัตราการเกิดงานสุทธิบนพื้นผิวเหล่านี้ ในทิศทาง x คือ

$$\left[\frac{\partial[u(-p + \tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (2.16a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ส่วนประกอบย่อยของแรงเนื่องจากความเค้นพื้นผิวในทิศทาง y และ z ก็จะทำงานบนอนุภาคดังกล่าวเช่นกัน ในกระบวนการคิดแบบข้างต้นอัตราการเกิดงานบนอนุภาคของไหลเนื่องจากการทำงานโดยแรงเหล่านี้สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial[v(-p+\tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (2.16b)$$

และ

$$\left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial[w(-p+\tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (2.16c)$$

อัตราการเกิดงานทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตรของของไหลโดยแรงบนพื้นผิวทั้งหมด คือผลรวมของ (2.16 a-c) หากด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$ ของของ p สามารถจัดรวม และเขียนในรูปแบบของไดเวอร์เจนซ์ (Divergent) ดังนี้

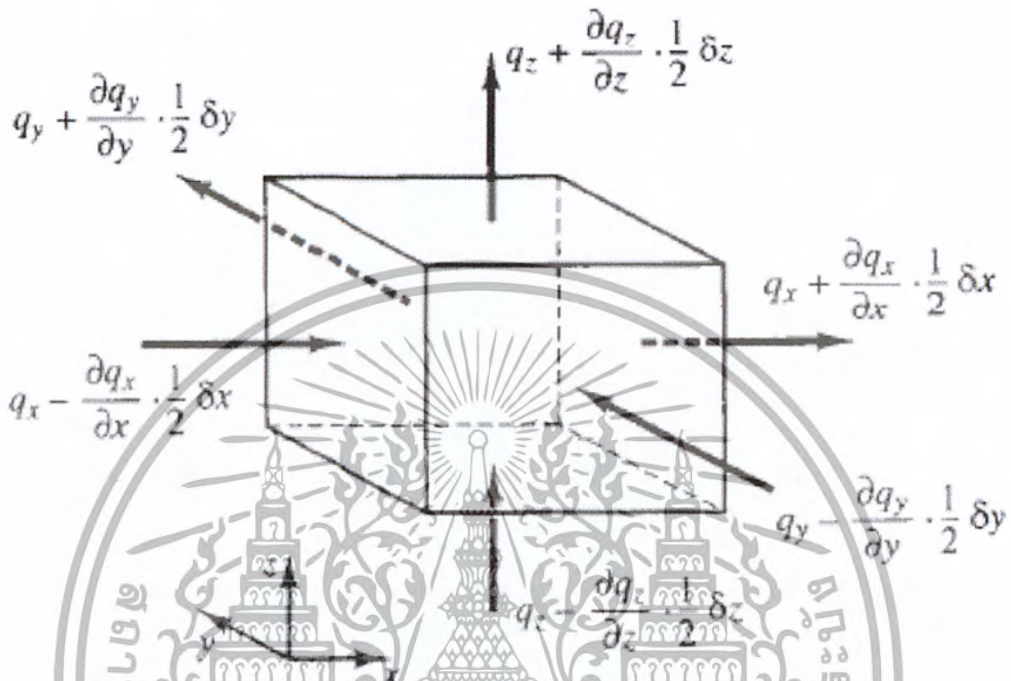
$$\frac{\partial(Up)}{\partial x} + \frac{\partial(Vp)}{\partial y} + \frac{\partial(Wp)}{\partial z} = \text{div}(pU)$$

ดังนั้น อัตราการเกิดงานรวมทั้งหมดบนชิ้นส่วนของของไหลโดยความเค้นบนพื้นผิว มีหน่วยเป็น ปริมาณของพลังงานต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยปริมาตร

$$[-\text{div}(pU)] + \left[\begin{aligned} &\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \\ &\frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] \quad (2.17)$$

ฟลักซ์เนื่องจากการนำความร้อน

เวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ q ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อย 3 ส่วนคือ q_x , q_y , q_z (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน [3]

อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่ขึ้นส่วนของไหลเนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนที่ทิศทาง x ถูกกำหนดโดยผลต่างระหว่างอัตราความร้อนที่เข้าผ่านผิวหน้า W กับอัตราความร้อนที่ออกจากผิวหน้า E

$$\left[\left(q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z$$

(2.18a)

ในทำนองเดียวกันอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของไหลเนื่องจากฟลักซ์ของความร้อนในทิศทาง y และ Z คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{\partial q_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \text{ และ } -\frac{\partial q_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (2.18b-c)$$

อัตราการร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรครอบคลุมขอบเขตของชิ้นส่วนของไหล จะเท่ากับผลรวมของ (2.18a-c) หาคด้วยปริมาตร $\delta x \delta y \delta z$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\text{div} \mathbf{q} \quad (2.19)$$

กฎของ Fourier ของการนำความร้อน อธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทปริมาณความร้อนต่อพื้นที่ (Heat flux) กับ ความแตกต่างอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_{yx} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

สามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{q} = -k \text{grad } T \quad (2.20)$$

รวมสมการ (2.19) และ (2.20) ซึ่งจะได้ว่า อัตราการเพิ่มของความร้อนที่อนุภาคของไหลเนื่องจากการนำความร้อนผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนของของไหล

$$-\text{div} \mathbf{q} = \text{div}(k \text{grad } T) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพลังงาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพลังงานจำเพาะของของไหล ซึ่งแทนด้วย E พลังงานของของไหลถูกนิยามเป็นผลรวมของพลังงานความร้อนภายใน i พลังงานจลน์ $\frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2)$ และพลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยมองว่าชิ้นส่วนของไหลมีการสะสมพลังงานศักย์โน้มถ่วง พลังงานภายในอาจไม่มีการรวมพลังงานศักย์เข้าไว้ในนิยามก็ได้ หากมองว่าวัตถุกำลังทำงานในขณะที่เคลื่อนที่ในสนามความโน้มถ่วงของโลกโดยงานในส่วนนี้เรียกว่า งานเนื่องจากน้ำหนักของวัตถุซึ่งเป็น Source term ในสมการพลังงาน มีหน่วยเป็นพลังงานต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

การอนุรักษ์พลังงานของชิ้นส่วนของไหล ทำได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของของไหล (2.15) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของการเกิดงานสุทธิบนชิ้นส่วนของไหล (2.17) และอัตราความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของของไหลเนื่องจากฟลักซ์ความร้อน (2.21) และอัตราการเพิ่มของพลังงานเนื่องจากเทอมของ Source ดังนั้นสมการพลังงาน คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(pU) + \left[\begin{array}{l} \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \\ \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (2.22)$$

ในสมการ 2.22 มี $E = i + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2)$

แม้ว่า (2.22) คือสมการพลังงานที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พลังงานภายในที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหล และพลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหล โดยจะพิจารณาพลังงานในแต่ละส่วนแยกจากกัน พลังงานจลน์ที่สัมพันธ์กับความเร็วของของไหลนั้นสามารถเขียนได้โดยการแปลงรูปของสมการโมเมนตัม กล่าวคือ ทำการคูณสมการ โมเมนตัมในทิศทาง x (2.14 a) ด้วยความเร็ว u สมการโมเมนตัมในทิศทาง y ด้วยความเร็ว v และสมการโมเมนตัมในทิศทาง z (2.14c) ด้วยความเร็ว w จากนั้นรวมผลลัพธ์เข้าด้วยกัน ก่อนทำการหารด้วย 2 ได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดังข้างล่างนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\left[\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)\right]}{Dt} &= -\mathbf{u} \cdot \text{grad } p + u \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ &+ v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \mathbf{u} \cdot \mathbf{S}_M \end{aligned} \quad (2.23)$$

ทำการลบ (2.23) จาก (2.22) และนิยาม Source term ขึ้นใหม่เป็น $S_i = S_E - \mathbf{u} \cdot \mathbf{S}_M$ จึงทำให้ได้สมการพลังงานภายในดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{Di}{Dt} &= -p \text{div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{ grad } T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \\ &\tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \\ &\tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned} \quad (2.24)$$

ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ จะมี $i = cT$ ซึ่ง c คือ ค่าความร้อนจำเพาะ และ $\text{div } \mathbf{u} = 0$ สามารถจัดเรียงสมการ (2.24) ในรูปของอนุกรมคือ

$$\begin{aligned} \rho c \frac{DT}{Dt} &= \text{div}(k \text{ grad } T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \\ &\tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \end{aligned} \quad (2.25)$$

สำหรับสมการไหลที่อัดตัวได้ (2.22) จัดรูปเป็นสมการสำหรับค่าเอนทาลปี และเนื่องจากค่าเอนทาลปีจำเพาะ h และค่าเอนทาลปีจำเพาะสัมบูรณ์ h_0 ของของไหลกำหนดได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = i + \frac{p}{\rho} \quad \text{and} \quad h_0 = h + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$

รวมสองนิยามนี้กับนิยามของพลังงานจำเพาะ E เข้าด้วยกัน จะได้

$$h = i + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = E + \frac{p}{\rho} \quad (2.26)$$

แทนค่า (2.26) ในสมการ (2.22) และจัดเรียงสมการใหม่ ได้สมการพลังงานรวม

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \text{div}(\rho h_0 \mathbf{U}) = \text{div}(k \text{ grad } T) + \frac{\partial p}{\partial t} \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \right. \\ \left. \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xz})}{\partial x} + \right. \\ \left. \frac{\partial(u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zz})}{\partial z} \right] + S_h \quad (2.27) \end{aligned}$$

สมการ (2.24), (2.25) และ (2.26) มิใช่สมการการอนุรักษ์พลังงานที่เพิ่มเติมเข้ามาใหม่ แต่เป็นอีก
รูปแบบหนึ่งของสมการพลังงาน (2.22)

2.1.7 สมการสถานะ

การเคลื่อนที่ของของไหลใน 3 มิติ อธิบายด้วยระบบของสมการอนุพันธ์ย่อย 5 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวล (2.4) สมการโมเมนตัมในทิศทาง x, y, z (2.14a – c) และสมการพลังงาน (2.24) ตัวไม่ทราบค่าประกอบด้วยตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 ตัวคือ ρ, p, i และ T โดยต่อไป จะพิจารณาการเชื่อมโยงทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างตัวแปร 4 ตัวนี้

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเรื่องนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่าง ๆ จะอยู่ภายใต้สมมติฐานของสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งหมายความว่าในปัญหาหนึ่ง ๆ แม้ความเร็วของของไหลจะมีค่าสูง และมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว แต่ก็สมมติให้ของไหลสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ไปสู่สภาวะใหม่อย่างรวดเร็วจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่ตำแหน่งหนึ่งเช่นกัน นั่นคือ ของไหลยังคงอยู่ในสภาวะสมดุลตลอดเวลา มีเพียงเงื่อนไขขยอกเว้นบางอย่างกับการไหลที่เป็นแบบ Strong shockwave แต่บางกรณีการไหลประเภทนี้ก็สามารถใช้สมมติฐานว่าของไหลอยู่ในสภาวะสมดุลได้ โดยให้ผลการจำลองได้ดีพอสมควร

ด้วยสมมติฐานดังกล่าว สามารถอธิบายสภาวะของสารในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ หากทราบค่าตัวแปร 2 ตัว ก็สามารถหาค่าตัวแปรตัวที่เหลือได้ เมื่อให้ ρ และ T เป็นตัวแปรที่ทราบค่ามีสมการสถานะสำหรับความดัน p และพลังงานภายในจำเพาะ i

$$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T) \quad (2.28)$$

สำหรับก๊าซสมบูรณ์สมการสถานะของมันซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีคือ

$$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T \quad (2.29)$$

สมมติฐานของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้ เมื่อนำมาใช้พิจารณาการไหลของของไหลที่อัดตัวได้ ยังช่วยเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวล และสมการ โมเมนตัม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการไหลนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นตามสมการสถานะ

การไหลของของไหล และก๊าซที่ความเร็วต่ำประพุดิตัวเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ เมื่อไม่มีการแปรเปลี่ยนของความหนาแน่น ก็ทำให้ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่าง สมการพลังงานกับสมการอนุรักษ์มวล และสมการ โมเมนตัม ในกรณีนี้สามารถหาคำตอบของสมการ โมเมนตัม คือ สนามการไหลได้โดยง่าย โดยพิจารณาเพียงสมการอนุรักษ์มวล และสมการ โมเมนตัมเท่านั้น และยังสามารถหาคำตอบของสมการพลังงาน คือ การกระจายอุณหภูมิได้โดยเอกเทศ หลังจากได้คำตอบของสนามการไหลแล้ว

2.1.8 สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน

สมการควบคุมประกอบด้วยตัวที่ไม่ทราบค่า คือ ความเค้นเนื่องจากความหนืดในแนวแกนย่อย T_{ij} ในการไหลของของไหลนั้น ค่าความเค้นหนืดสามารถอธิบายได้โดยอัตราการเสีรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ (หรืออัตราความเครียด) ในการไหล 3 มิติอัตราการเสีรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ ประกอบด้วยอัตราการเสีรูปร่างเชิงเส้น และอัตราเสีรูปร่างเชิงปริมาตร

ก๊าซทุกชนิดโดยส่วนมากมีคุณสมบัติเป็นแบบ Isotropic ในขณะที่ของเหลวบางชนิดที่ประกอบด้วยโมเลกุลของโพลีเมอร์ ในจำนวนที่มากพออย่างมีนัยสำคัญ อาจจะมีประพุดิตัวเป็น Anisotropic หรือคุณสมบัติของความเค้นหนืดแบบขึ้นอยู่กัทิศทาง ซึ่งเป็นผลของการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลของโพลีเมอร์ ของไหลดังกล่าวอยู่นอกเหนือจากขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการศึกษาโดยสมมุติว่าการไหลเป็น Isotropic

อัตราการเสีรูปร่างเชิงเส้นของชิ้นส่วนของไหลมี 9 องค์ประกอบใน 3 มิติ ในจำนวนนั้น มี 6 องค์ประกอบที่เป็นอิสระในของไหลแบบ Isotropic (Schlichting, 1979) เขียนด้วยสัญลักษณ์ e_{ij} ระบบการอ้างอิงในตัวย่อต่อท้ายสัญลักษณ์ ให้อ้างอิงองค์ประกอบซึ่งเป็นระบบเดียวกับระบบอ้างอิงของความเค้น มีองค์ประกอบของการเสีรูปร่างเชิงเส้นแบบตั้งฉากอยู่ 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.30a)$$

นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบการเสีรูปร่างเชิงเส้นแบบเฉือนทั้ง 6 ด้านของชิ้นส่วนของไหล คือ

$$\begin{aligned} e_{xy} = e_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ e_{xz} = e_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ e_{yz} = e_{zy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.30b)$$

การเสีรูปร่างเชิงปริมาตรถูกให้โดย

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div}U \quad (2.30c)$$

ในของไหลแบบ Newtonian ความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็นส่วนโดยตรงกับอัตราของการเสีรูปร่างของของไหล ตามกฎความหนืดของนิวตันในปริภูมิ 3 มิติสำหรับของไหลที่อัดตัวได้นั้น การไหลจะมีความหนืดเชื่อมโยงอย่างแปรผันตามค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดที่หนึ่ง (Dynamic viscosity), μ ซึ่งเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างเชิงเส้นของของไหล และ 2) ความหนืดที่สอง λ จะเชื่อมโยงกับการเสีรูปร่างปริมาตร ดังนั้นจะมีองค์ประกอบย่อยของความเค้นอยู่ทั้งหมด 9 ตัว โดยมี 6 ตัวในนั้นไม่ขึ้นแก่กัน หรือเรียกว่ามีระดับอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} U$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} U$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.31)$$

ภาพของความหนืดในส่วนที่สองนั้นไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากผลในทางปฏิบัติมีไม่มากนักสำหรับก๊าซ การประมาณค่าที่ดีคือ $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ (Schlichting, 1979) เนื่องจากสมมติว่าของเหลวเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ซึ่งจากสมการอนุรักษ์มวล คือ $\operatorname{div} U = 0$ ดังนั้นความเค้นหนืดจะเป็น 2 เท่าของอัตราการผลิตเชิงเส้น

แทนค่าความเค้นเฉือนข้างบน (2.31) ไปใน (2.14a - c) ได้สมการซึ่งเรียกตามชื่อ Navier-Stokes ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 19 ที่โด่งดังนี้

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (2.32a)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} U \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (2.32b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} U \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (2.32c)$$

สามารถจัดเรียงเทอมของความเค้นหนืดใหม่ ตัวอย่าง ในกรณีสมการ 2.32a ดังข้างล่าง

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} U \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ &\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \operatorname{div} U) = \\ &\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) + S_{Mx} \end{aligned}$$

ความเค้นหนืดในสมการที่เป็นองค์ประกอบในทิศทาง y และ z สามารถจัดใหม่ในลักษณะเดียวกัน สามารถสร้างสมการโมเมนตัมอย่างง่าย โดยการซ้อนเทอมของความเค้นหนืดในเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม (Source term) ดังนั้น จึงนิยามเทอมของการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมใหม่โดย

$$S_M = S_M + S_M \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Navier-Stokes สามารถเขียนในรูปแบบที่ใช้สำหรับการพัฒนาวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม
ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{Mx} \quad (2.34a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{My} \quad (2.34b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + S_{Mz} \quad (2.34c)$$

ถ้าใช้แบบจำลอง Newtonian สำหรับความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายใน (2.24) จะได้

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } U + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (2.35)$$

ผลกระทบทั้งหมดเนื่องจากความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายใน สามารถเขียนได้ในเทอมของ
ฟังก์ชันการสลายตัว (Dissipation function) Φ ซึ่งหลังจากการปรับรูปแบบสมการสามารถแสดงได้
ดังนี้

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div} U)^2 \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสลายตัวจะมีเป็นค่าบวกเสมอ เนื่องจากประกอบด้วยเทอมยกกำลังสอง และแทนการก่อกำเนิดของพลังงานภายในอันเป็นผลมาจากการเสีรูปร่างของชิ้นส่วนของไหล อีกนัยหนึ่ง คือ เป็นตัวลดทอนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหล และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือความร้อนนั่นเอง

2.1.9 รูปแบบอนุรักษ์สำหรับสมการควบคุมของการไหลของของไหล

ตารางที่ 2.1 แสดงสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ในรูปแบบของไดเวอร์เจนซ์ เป็นสมการแบบ 3 มิติที่ขึ้นกับเวลา ของของไหลนิวโทเนียนที่อัดตัวได้

ตารางที่ 2.1 สมการควบคุมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนอัดตัวได้

มวล	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0$	(2.4)
โมเมนตัม x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx}$	(2.37a)
โมเมนตัม y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My}$	(2.37b)
โมเมนตัม z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz}$	(2.37c)
พลังงานภายใน	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i U) = -p \text{div } \vec{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i$	(2.38)
สมการสถานะ	$p = p(\rho, T) \text{ and } i = i(\rho, T)$	(2.28)
	$p = \rho RT \text{ and } i = C_v T$	(2.29)

เทอมการก่อกำเนิดของโมเมนตัม S_M และฟังก์ชันการสลายตัว Φ แสดงใน 2.32 และ 2.36 ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจที่ว่าสมมติฐานสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้น ทำให้ได้สมการการไหล (PDEs) 5 สมการและสมการพีชคณิต 2 สมการรวมเป็น 7 สมการ ต่อมาใช้แนวคิดของของไหลนิวโทเนียน ซึ่งอธิบายความเค้นหนืดในเทอมของความแตกต่างขององค์ประกอบความเร็วต่อหน่วยความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาว เป็นผลให้เกิดตัวไม่ทราบค่า 7 ตัว จำนวนที่เท่ากันของสมการ และตัวที่ไม่ทราบค่าของระบบนี้ สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยเงื่อนไขขอบเขต และค่าเริ่มต้น (Boundary and Initial condition)

2.2 แบบจำลอง $k - \epsilon$ [9]

2.2.1 Standard $k - \epsilon$ Model

2.2.1.1 ภาพรวม

เป็นแบบจำลองที่เรียบง่ายที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นแบบจำลองสองสมการ ซึ่งวิธีแก้สมการการถ่ายเทสองสมการแยกกัน ได้แก่ turbulent velocity และ length scales สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ ใช้ในการคำนวณการไหลในงานวิศวกรรม เนื่องจากแบบจำลองนี้มีความเสถียร ประหยัด และมีความแม่นยำในช่วงการไหลปั่นป่วนที่กว้าง โดยนิยมใช้ในการไหลในอุตสาหกรรมและการจำลองการถ่ายเทความร้อน

แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลอง semi-empirical อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และอัตราการกระจายตัว (ϵ) แบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับ k ได้มาจากสมการมั่นคงตรง ขณะที่แบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับ ϵ ได้มาจากการใช้เหตุผลทางกายภาพบางประการ

ในการได้มาของแบบจำลอง $k - \epsilon$ ได้สมมติฐานว่าการไหลนั้นปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully Developed Flow) และผลกระทบของความหนืดระดับโมเลกุลนั้นละทิ้งได้ ดังนั้นแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ จะมีเฉพาะการไหลปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

2.2.1.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$

พลังงานจลน์ปั่นป่วน k และอัตราของการสลายพลังงานจลน์ปั่นป่วน ϵ ได้มาจากสมการการถ่ายเทต่อไปนี้ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.37)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.38)$$

ในสมการนี้ G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงการสนับสนุนของการขยายตัวที่เปลี่ยนแปลงในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการผลิตทั้งหมด $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, และ $C_{3\epsilon}$ เป็นค่าคงที่ σ_k และ σ_ϵ เป็น Turbulent Prandtl numbers สำหรับ k และ ϵ ตามลำดับ S_k และ S_ϵ เป็นพจน์ที่กำหนดเอง

2.2.1.3 การจำลองความหนืดปั่นป่วน

ความหนืดปั่นป่วน (ไหลวน) μ_t คำนวณโดยการรวม k และ ϵ ดังนี้:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.39)$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่

2.2.1.4 ค่าคงที่แบบจำลอง

ค่าคงที่แบบจำลอง $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k และ σ_ϵ มีค่ามาตรฐานดังนี้:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

ค่าคงที่เหล่านี้ได้กำหนดจากการทดลองกับอากาศและน้ำสำหรับพื้นฐานการไหลปั่นป่วน รวมถึง การไหลเฉือนเอกพันธ์และการสลายตัวแบบ isotropic ของสนามความปั่นป่วน โดยพบจากการทดลองที่ช่วงขอบเขตผนังที่กว้างและการไหลแบบไม่มีแรงเฉือน

2.2.2 RNG $k - \epsilon$ Model

2.2.2.1 ภาพรวม

แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ ได้มาจากการใช้เทคนิคทางสถิติ (เรียกว่า ทฤษฎีการทำให้เป็นกลุ่มมาตรฐาน) โดยจะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ แต่ได้รวมเงื่อนไขต่าง ๆ เข้าไปด้วย

- แบบจำลอง RNG มีพจน์ที่เพิ่มเข้ามาในสมการ ϵ ช่วยเพิ่มความแม่นยำสำหรับการไหลที่มีความเครียดเปลี่ยนแปลงกะทันหัน
- ผลกระทบสำหรับการหมุนวนบนการไหลปั่นป่วนได้รวมอยู่ในแบบจำลอง RNG ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับการไหลหมุนวน
- ทฤษฎี RNG มีสูตรสำหรับ Turbulent Prandtl numbers ขณะที่ standard $k - \epsilon$ จะกำหนดให้เป็นค่าคงที่
- ขณะที่แบบจำลอง standard $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลอง high-Reynolds-number ทฤษฎี RNG จะมีสมการอนุพันธ์สำหรับความหนืดที่มีผลต่อการไหล ซึ่งคำนวณสำหรับผลกระทบที่ low-Reynolds-number โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับที่บริเวณขอบเขตใกล้ผนัง

ในส่วนนี้เองที่ทำให้แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ มีความแม่นยำมากขึ้นและเชื่อถือได้สำหรับช่วงการไหลที่กว้างกว่าแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ กล่าวอีกนัยหนึ่ง RNG อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ โดยได้มาจากสมการนาวิเยร์ - สโตกส์ ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า วิธี "renormalization group" (RNG) การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าคงที่ที่แตกต่างจากค่าในแบบจำลอง standard $k - \epsilon$ กล่าวคือ มีพจน์และฟังก์ชันที่เพิ่มเข้ามาในสมการการถ่ายเทสำหรับ k และ ϵ

2.2.2.2 สมการการถ่ายเทสำหรับแบบจำลอง RNG $k - \epsilon$

แบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบของแบบจำลอง standard $k - \epsilon$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2.41)$$

ในสมการนี้ G_k แสดงถึงการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องมาจากเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย G_b เป็นการกำเนิดของพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องมาจากแรงลอยตัว Y_M แสดงถึงความผันผวนของการขยายตัวในความปั่นป่วนอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายทั้งหมด ปริมาณ α_k และ α_ϵ คือประสิทธิภาพย้อนกลับของ Prandtl numbers สำหรับ k และ ϵ ตามลำดับ ส่วน S_k และ S_ϵ เป็นพจน์กำเนิดของ k และ ϵ ตามลำดับ นั้นเอง

2.2.2.3 จำลองผลกระทบเนื่องจากความหนืด

ในกระบวนการวิเคราะห์พจน์ในทฤษฎี RNG ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์ของความหนืดปั่นป่วน ดังต่อไปนี้

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (2.42)$$

ซึ่ง

$$\hat{\nu} = \mu_{eff} / \mu$$

$$C_\nu \approx 100$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 2.40 จะได้เทอมของความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการถ่ายเทสุทธิตันเนื่องมาจากความปั่นป่วน กับเทอมของค่า Effective Reynolds number ซึ่งทำให้แบบจำลองสามารถรองรับรูปแบบการไหลที่ค่า Reynolds number ต่ำได้เช่น ในกรณีการไหลใกล้ผนัง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.43)$$

โดย $C_\mu = 0.0845$ ได้มาโดยใช้ทฤษฎี RNG ซึ่งสังเกตว่าค่าของ C_μ นั้นใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดจากการทดลอง 0.09 ที่ใช้ในแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ โดยปกติแล้วการคำนวณผลกระทบอันเนื่องมาจากความหนืดเมื่อใช้รูปแบบ Reynolds number สูงๆ ที่มีอยู่ในสมการ 2.43 อย่างไรก็ตามสามารถเลือกใช้ความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันที่มีอยู่ในสมการที่ 2.42 ใช้ในกรณีที่รวมค่า Reynolds number ต่ำ เข้าไปในการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเตาอบไฟฟ้า [4]



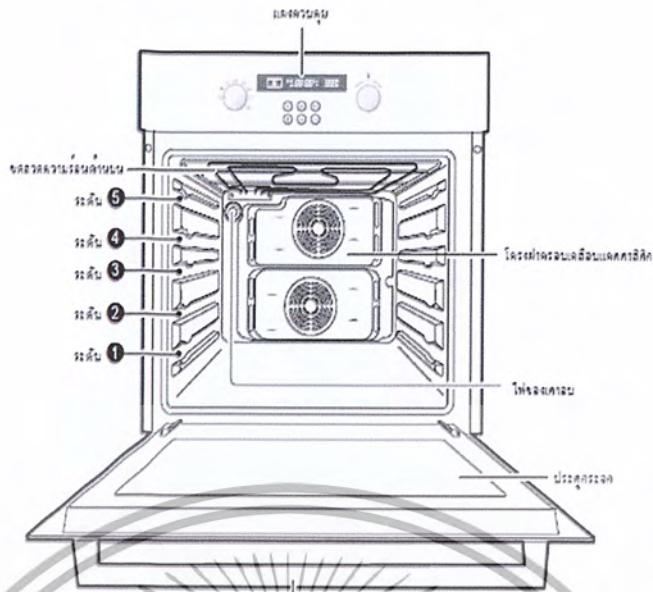
รูปที่ 3.1 เตาอบไฟฟ้าซัมซุงรุ่น BF62CBST [4]

เตาอบไฟฟ้าซัมซุงรุ่น BF62CBST เป็นเตาอบไฟฟ้าระบบกระจายความร้อนสองชุดที่มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายด้วยชุดทำความร้อนสองระบบ ส่งผลให้ความร้อนได้มากขึ้น โดยจะทำให้ใช้เวลาการทำอาหารน้อยลง มีระบบควบคุมที่แยกการควบคุมอุณหภูมิและตั้งเวลาจากกันโดยอิสระและสามารถปรุงอาหารสองชนิดพร้อมกันได้ที่อุณหภูมิและการตั้งเวลาที่แตกต่างกันทำให้ประหยัดทั้งพลังงาน และเวลาภายในเตาอบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลด้านเทคนิคของเตาอบ SAMSUNG รุ่น BF62CBST [4]

แหล่งพลังงาน	220V ~ 50Hz
ปริมาตร (ความจุที่ใช้งาน)	65 ลิตร
พลังงานเอาต์พุต	สูงสุด 3,050 วัตต์
น้ำหนัก	40 kg โดยประมาณ
ขนาดช่องของเตาอบ (กว้าง×สูง×ลึก)	440 x 365 x 405 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงภายในเตาอบไฟฟ้า [4]

ภายในเตาอบจะประกอบด้วยชุดลวดความร้อนอยู่ด้านบน ไฟเตาอบบอกสถานะการทำงาน
ของเตา ที่กลมสองตัวเพื่อกระจายความร้อนภายในเตาอบ



รูปที่ 3.3 แสดงรูปเตาอบไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ

3.2.1 การเขียน CAD ของเตาอบไฟฟ้า

ทำการสร้าง CAD โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบช่วยในการสร้าง ซึ่งผู้จัดทำใช้โปรแกรม Solid Works ในการสร้าง CAD ของเตาอบไฟฟ้า เพราะมีฟังก์ชันการใช้งานที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน และสามารถนำไปสร้างเป็นแบบจำลองต่อไป ดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5



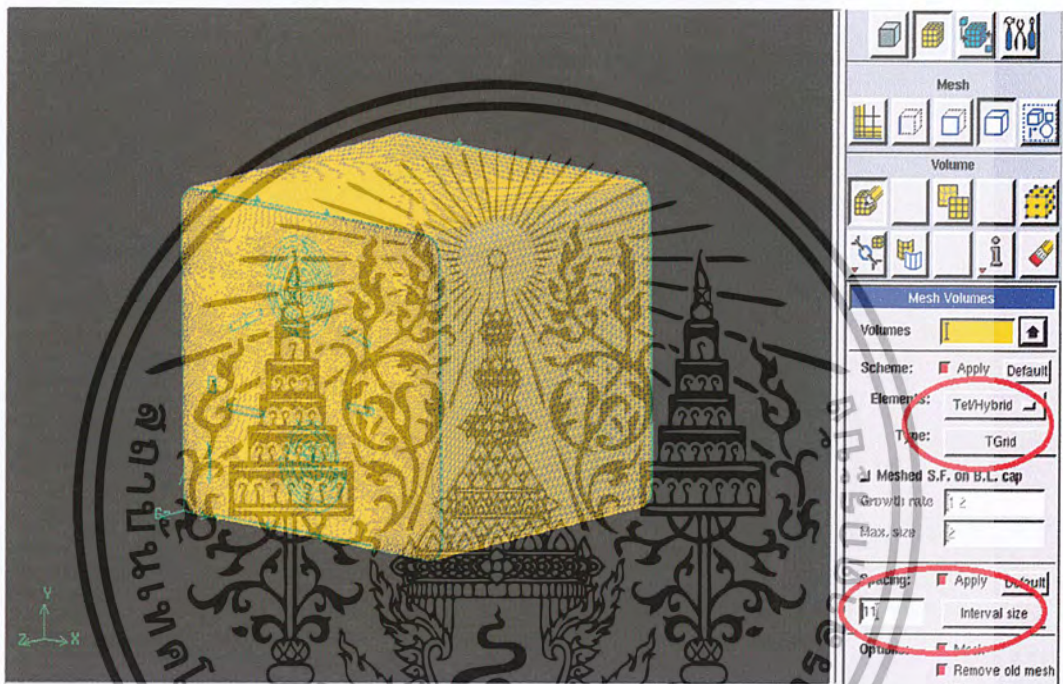
รูปที่ 3.4 แสดงภาพ CAD ของเตาอบไฟฟ้าที่สร้างจากโปรแกรม Solid Works

รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองของไหลด้วยโปรแกรม Solid Works

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้าง Mesh ของแบบจำลองเตาอบไฟฟ้า

สร้าง Mesh โดยใช้โปรแกรม GAMBIT 2.4 ซึ่งสร้างจากไฟล์ CAD ขึ้นมาจากขั้นตอนแรกเป็นไฟล์ .x_t เป็นไฟล์ Parasolid จากนั้น Export ไฟล์เข้าไปในโปรแกรม GAMBIT 2.4 แล้วทำการสร้าง Mesh โดยกำหนดรูปแบบ Mesh เป็นเอลิเมนต์ ปริมาตรสามเหลี่ยม (Tet/Hybrid) ชนิด TGrid และกำหนดรูปแบบเป็น Interval size = 11 เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการสร้าง Mesh และได้ออกมาจำนวน 770922 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการสร้าง Mesh ด้วยโปรแกรม GAMBIT 2.4

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล โดยกำหนดให้ภายในช่องเตาอบเป็นโมเดลของอากาศทั้งหมด คือ อากาศ (Air) เป็นของไหล (FLUID) จากนั้นทำการกำหนดทางเข้า และทางออกของลมภายในช่องเตาอบ โดยกำหนดช่องทางออกเป็นอากาศไหลออก (OUT FLOW) ช่องทางเข้าของอากาศเป็นความเร็วเข้า (VELOCITY_INLET) และพื้นผิวต่าง ๆ ที่ไม่ได้กำหนดโปรแกรมจะทำ

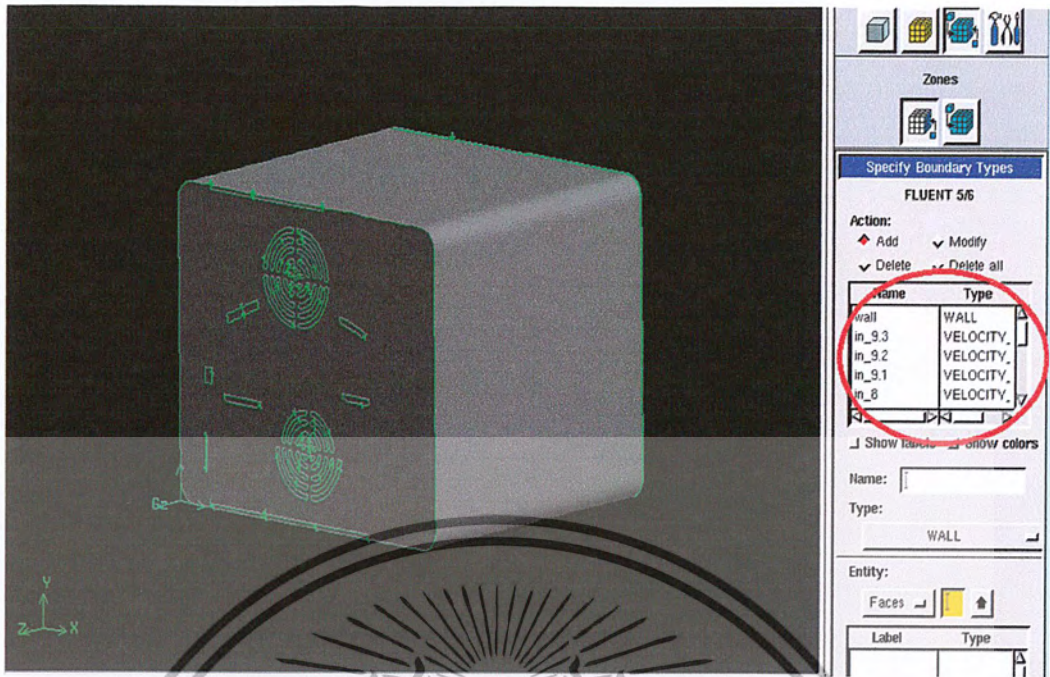
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดเงื่อนไขเป็นผนัง (WALL) โดยอัตโนมัติตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา ซึ่งทางออกของลมจะอยู่บริเวณช่องตรงกลางที่มีลักษณะเหมือนตะแกรงกลมอยู่กึ่งกลางทั้งด้านบนและด้านล่าง และช่องลมเข้าสู่ช่องเตาอบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมกระจายอยู่บริเวณรอบ ดังรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แสดงการสร้าง Mesh โดยกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองเป็น AIR FLUID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

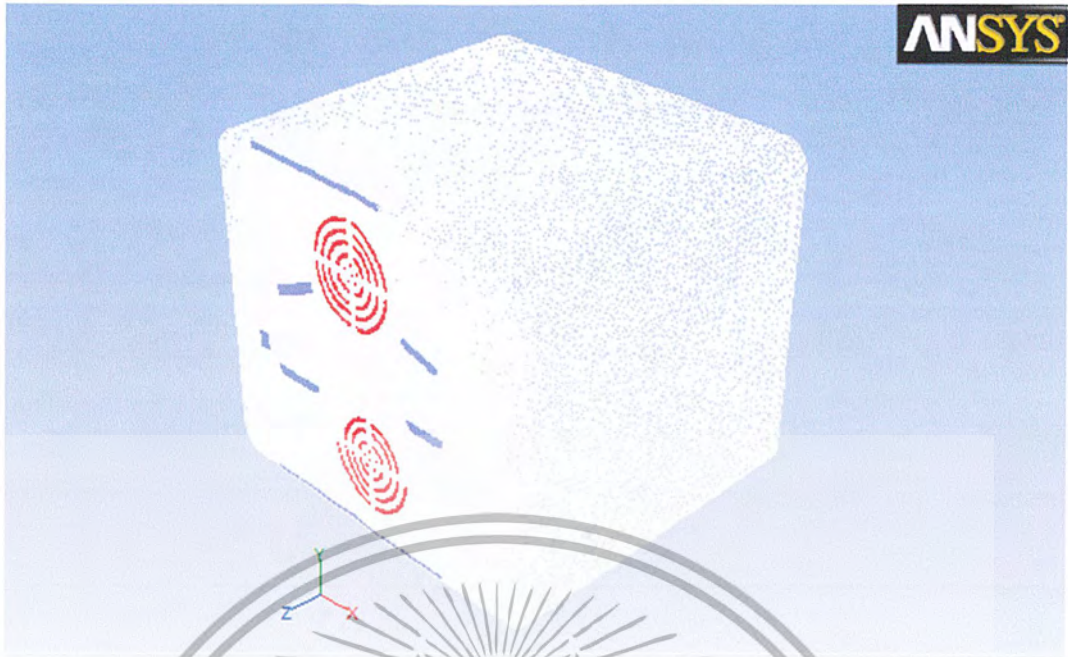


รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดเงื่อนไขช่องทางเข้าและออกของอากาศภายในแบบจำลองของเตาอบ

เมื่อทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการการจำลองที่เราสร้างขึ้นเรียบร้อยแล้ว จึงทำการตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้น Export ไฟล์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม GAMBIT 2.4 โดยกำหนดให้ไฟล์นามสกุลเป็น .msh เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม ANSYS FLUENT ได้

3.2.4 การจำลองการไหลในโปรแกรม ANSYS FLUENT

เมื่อได้แบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม GAMBIT 2.4 ที่มีการสร้าง Mesh และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหลเรียบร้อยแล้ว จากนั้น Import ไฟล์เข้ามายังโปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อให้โปรแกรมคำนวณแบบจำลองช่องเตาอบเพื่อการกระจายตัวของลมภายในช่องเตาอบ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงแบบจำลองที่สร้างในโปรแกรม ANSYS FLUENT

3.2.5 การกำหนดปัญหาที่ใช้ในการจำลอง

ในการกำหนดปัญหาของแบบจำลอง เริ่มจากการกำหนดปัญหาพื้นฐาน คือ สเกลในแบบจำลอง ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เป็นหน่วยมิลลิเมตร จากนั้นกำหนดรูปแบบการคำนวณ Time เป็นแบบ Steady และ Models ที่ใช้ในการคำนวณคือ Standard $k - \epsilon$ Model ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2.2 และต่อจากนั้นกำหนดค่าความหนาแน่นของอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของอากาศ ต่อมาทำการใส่ค่าเริ่มต้นให้กับทางเข้าและทางออกของอากาศในช่องเตาอบ โดยกำหนดเป็นความเร็วเริ่มต้นให้กับช่องทางเข้าต่าง ๆ และให้ช่องทางออกเป็นตัวแปรที่โปรแกรมจะทำการคำนวณให้ (Out Flow) ต่อจากนั้นเลือกวิธีการที่ใช้ในการคำนวณ แล้วทำการยืนยันค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรม และสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

3.2.6 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของอากาศ

สมการการไหลสามารถอธิบายได้ว่ามีความสัมพันธ์กับกฎการอนุรักษ์มวล และ โมเมนตัมของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ซึ่งเป็นของไหลชนิดนิวตันเนียน (Newtonian Fluid) เช่น อากาศ เป็นต้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในพิกัดคาร์ทีเซียน คือ $x_i (i = 1, 2, 3)$ และสามารถพิจารณาสมการได้ดังนี้

จากกฎการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อความดันในเตาอบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้น $\rho =$ ค่าคงที่ จึงได้

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.2)$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.3)$$

$$\text{โดย } \vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.4)$$

เมื่อ p เป็นความดันคงที่, $(\vec{\tau})$ เป็นความเค้นตามแนวแกน, $\rho \vec{g}$ เป็นแรงโน้มถ่วงของวัตถุซึ่งจะไม่นำมาพิจารณา, \vec{F} เป็นแรงภายนอกของวัตถุ, I คือ Unit Tensor

ในเทอมของ $\nabla \vec{v}$ จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากของไหลไม่เกิดการอัดตัว ซึ่งมีค่าความหนาแน่นคงที่ จากสมการอนุรักษ์มวล $\nabla \vec{v} = 0$

จึงได้

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_{TOT} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_i} (p + \frac{2}{3} \mu_{TOT} \frac{\partial u_j}{\partial x_j}) + \frac{1}{\rho_a} f_i \quad (3.5)$$

เมื่อ $u_i (i = 1, 2, 3)$ คือ ส่วนประกอบในพิกัดคาร์ทีเซียนของเวกเตอร์ความเร็ว u (m/s), f_i คือ โมเมนตัมของแรงภายนอก คุณสมบัติอากาศได้ใช้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ซึ่งมีความหนาแน่น $\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ความหนืด $\mu_a = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ โดยมีสมมติฐานว่าเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ เพราะ

กำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ และความเร็วของอากาศมีค่าน้อยกว่าความเร็วเสียง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันจึงเกิดน้อยมาก

จากสมการ $k - \epsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon + Y_M + S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.7)$$

เมื่อ G_k คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน จากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย แต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากไม่ได้ทำการจำลองสมการพลังงาน

G_b คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน จากแรงลอยตัวแต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากไม่ได้จำลองแรงลอยตัว

Y_M คือ การเพิ่มความแปรปรวน ในอัตราการแพร่รวมแบบปั่นป่วนที่อัดตัวได้แต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากเป็นของไหลที่ไม่อัดตัว เพราะมีการเปลี่ยนแปลงความดันภายในน้อยมาก

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ คือ พลาหนที่นับเบอร์ (Prandtl Number)

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ และ $C_{3\epsilon}$ คือ ค่าคงที่

S_k, S_ϵ คือ Source terms แต่ไม่นำมาพิจารณา

μ_t คือ ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน โดย $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$
จะได้

$$\frac{\partial}{\partial t}(k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(k u_i) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_a + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \epsilon \quad (3.8)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon u_i) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = -C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

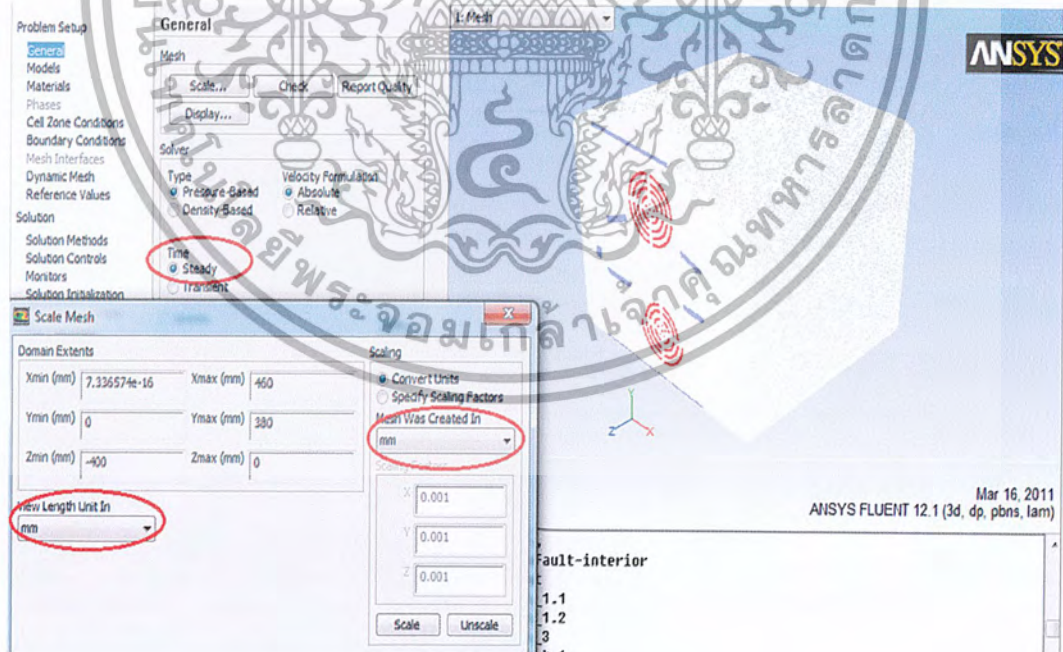
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าคงที่ของ C ในสมการ $k - \epsilon$ [10]

$k - \epsilon$	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_{μ}	σ_k	σ_{ϵ}
Standard model	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

ค่าที่ได้จากตารางมาจากการทดลองของอากาศและน้ำ สำหรับความเค้นเฉือนของการไหลแบบปั่นป่วน

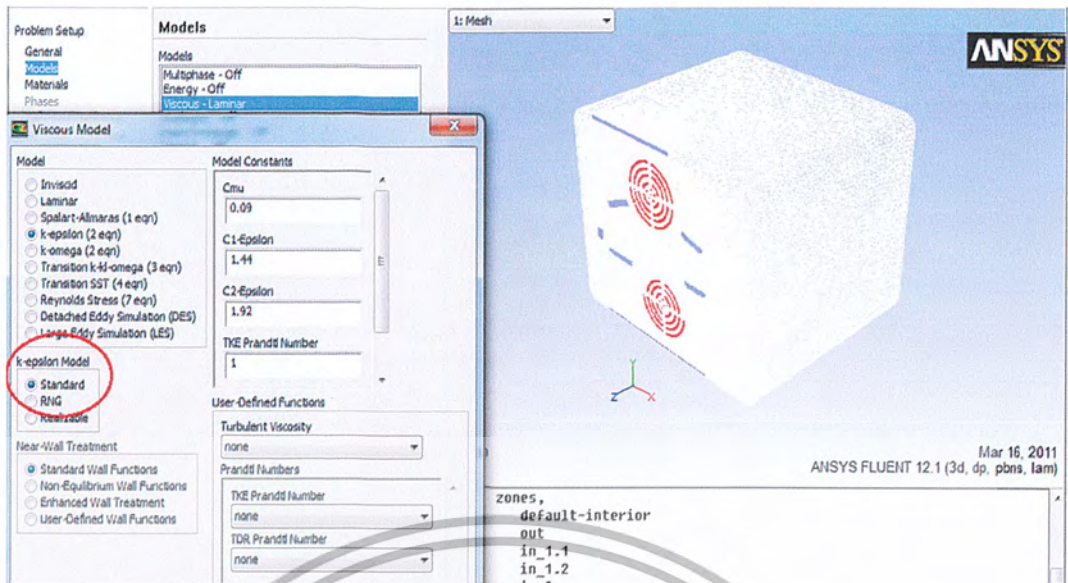
สมการ $k - \epsilon$ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะมีสมการที่ใช้อยู่ 2 สมการที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีสมมติฐานให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ และไม่คิดผลของความหนืดในระดับโมเลกุล ซึ่ง k คือ พลังงานจลน์ และ ϵ คือ อัตราการกระจายตัวของของการไหลแบบปั่นป่วน โดย k มาจากการหาอนุพันธ์ของสมการแมนตรง และ ϵ มาจากสภาพทางกายภาพ ที่สัมพันธ์กับสมการทางคณิตศาสตร์

ในการกำหนดหน่วยที่ใช้ในการจำลอง ใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตรตามแบบที่ได้สร้าง CAD ขึ้นมาจากโปรแกรม Solid Works ตามรูปที่ 3.10 และเลือกรูปแบบการคำนวณ ดังรูปที่ 3.11



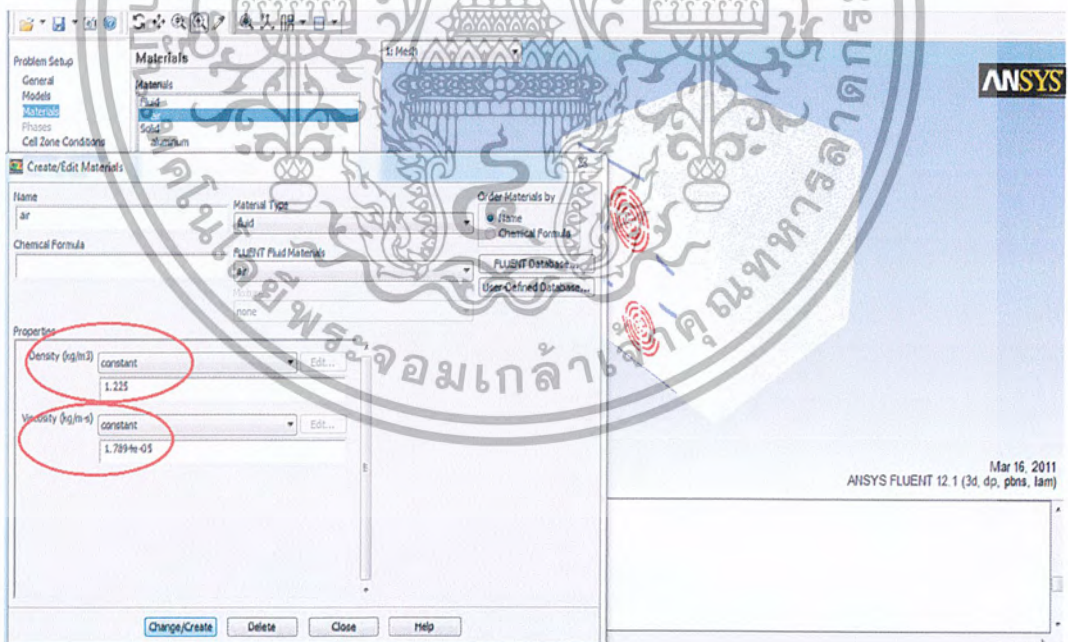
รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดสเกลและ Steady Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการกำหนดรูปแบบการคำนวณเป็น Standard k-epsilon Model

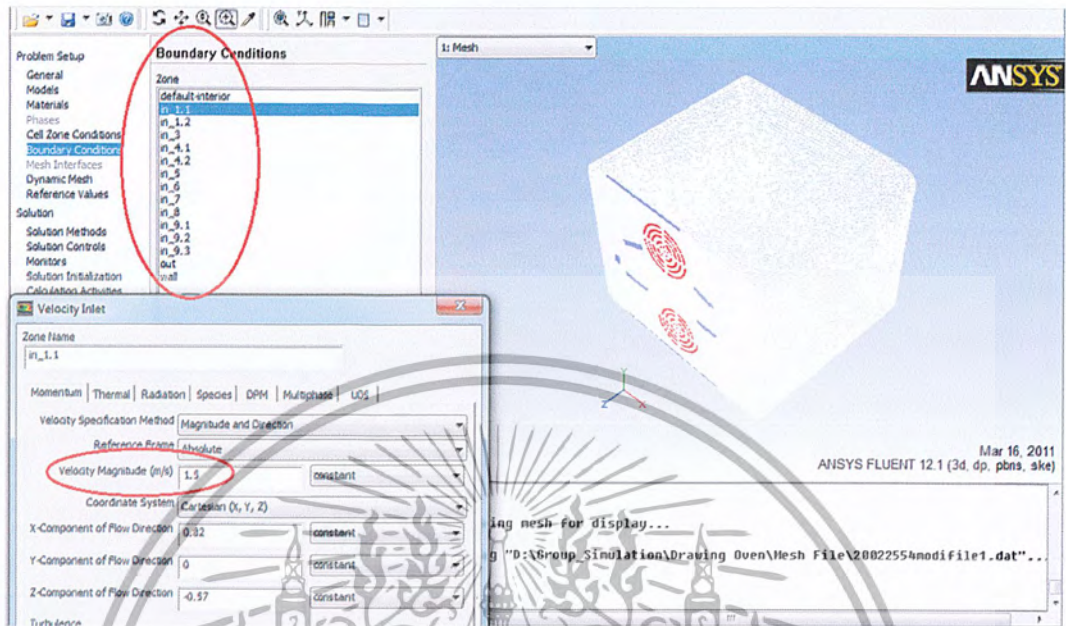
ในแบบจำลองได้กำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนืดของอากาศ เท่ากับ 1.798×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรวินาที ดังรูปที่ 3.12



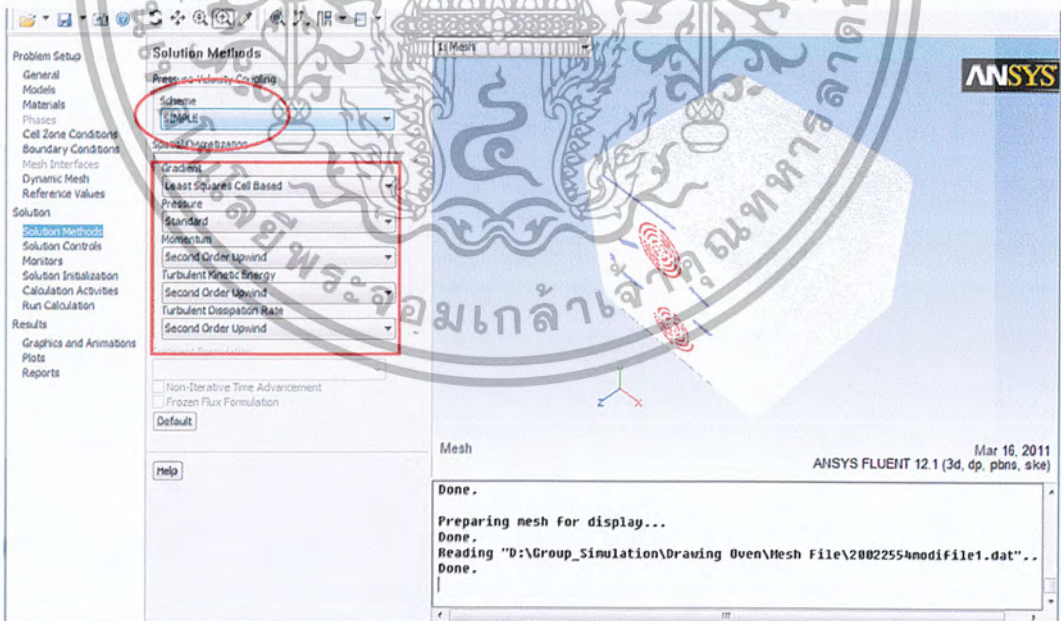
รูปที่ 3.12 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าเริ่มต้นของแต่ละช่องการไหลในหน่วยของ เมตรต่อวินาที ซึ่งนำค่าที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่องมือวัดมาใส่ค่าให้ครบทุกเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นของความเร็วทางเข้าของช่องเตาอบ



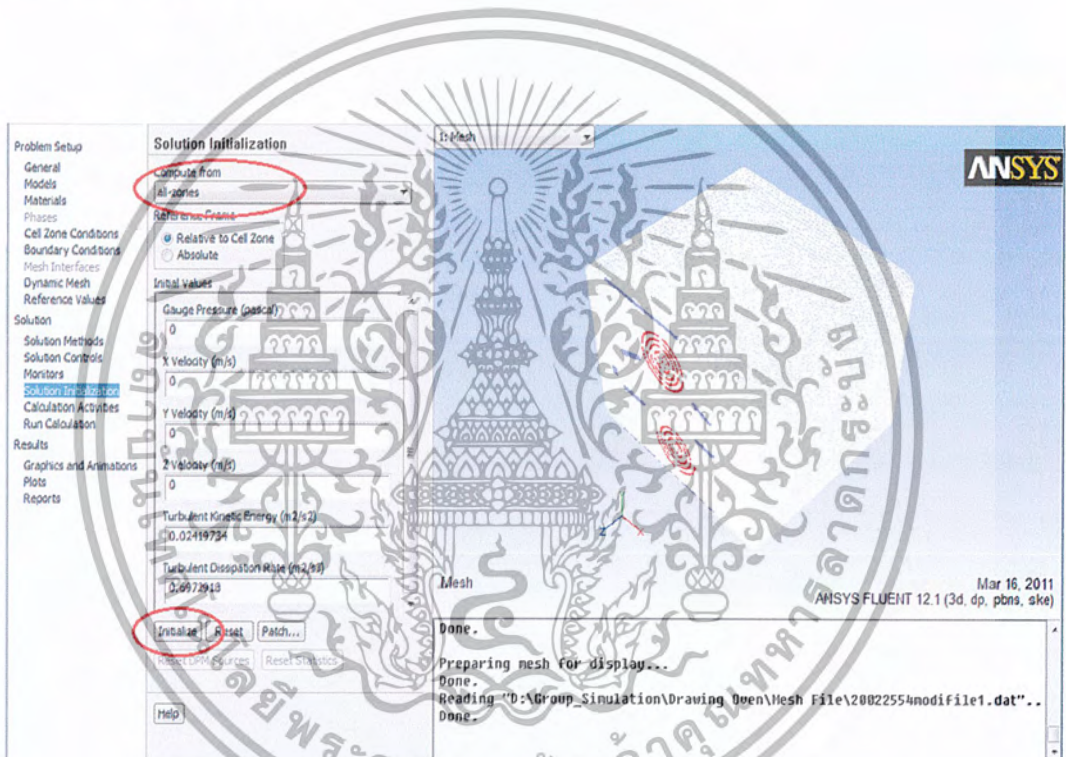
รูปที่ 3.14 แสดงการกำหนดวิธีการคำนวณในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองการไหลของอากาศ ในที่นี้เลือกใช้วิธีการคำนวณแบบ SIMPLE และวิธีการคำนวณโมเมนต์ดัดเป็นแบบ Second Order Upwind ดังรูปที่ 3.14

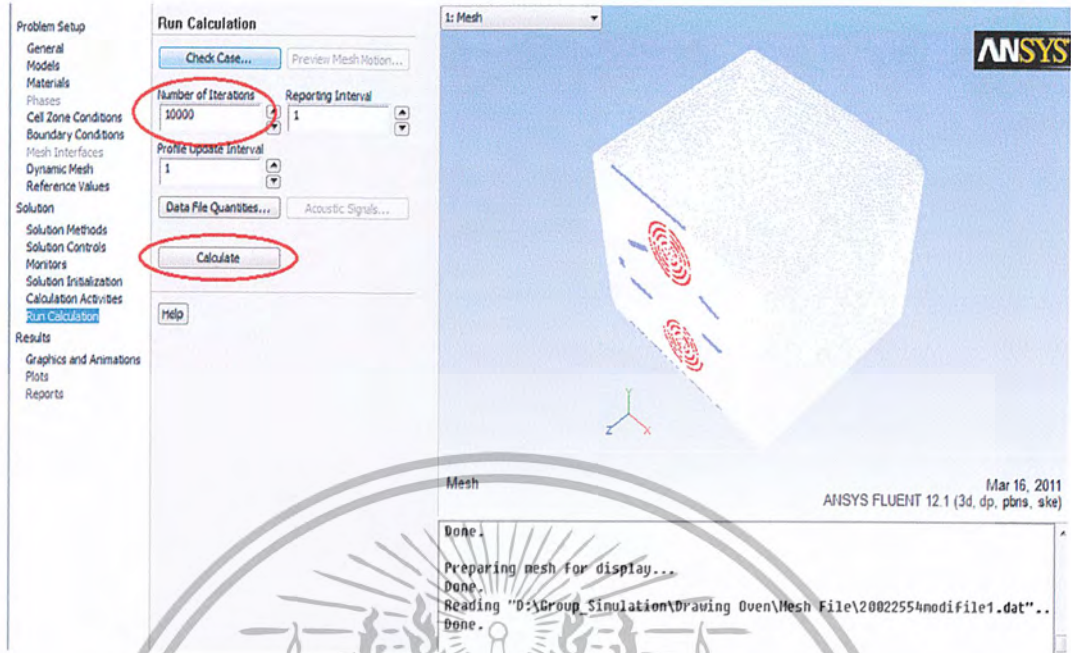
ต่อไปสั่งให้โปรแกรมรับค่าเริ่มต้นที่ได้กำหนดไว้แล้ว ในทุกส่วน (all-zones) และสั่ง Initialization ตามที่แสดงในรูปที่ 3.15

สุดท้ายสั่งให้โปรแกรมเริ่มการคำนวณ โดยการกำหนดค่า Number of Iterations ซึ่งกำหนดไว้ 10,000 โปรแกรมจะคำนวณเป็นครั้งตามจำนวนที่กำหนด แต่ถ้าผลการคำนวณมีค่าลู่เข้า (Converge) ตามที่ได้กำหนดไว้การคำนวณอาจจะไม่ถึง 10,000 ครั้งก็ได้ โดยที่โปรแกรมทำงานเสร็จสิ้นก่อน ซึ่งแสดงกำหนดดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ให้กับโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงการกำหนดให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ

3.3 การทดลองเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม

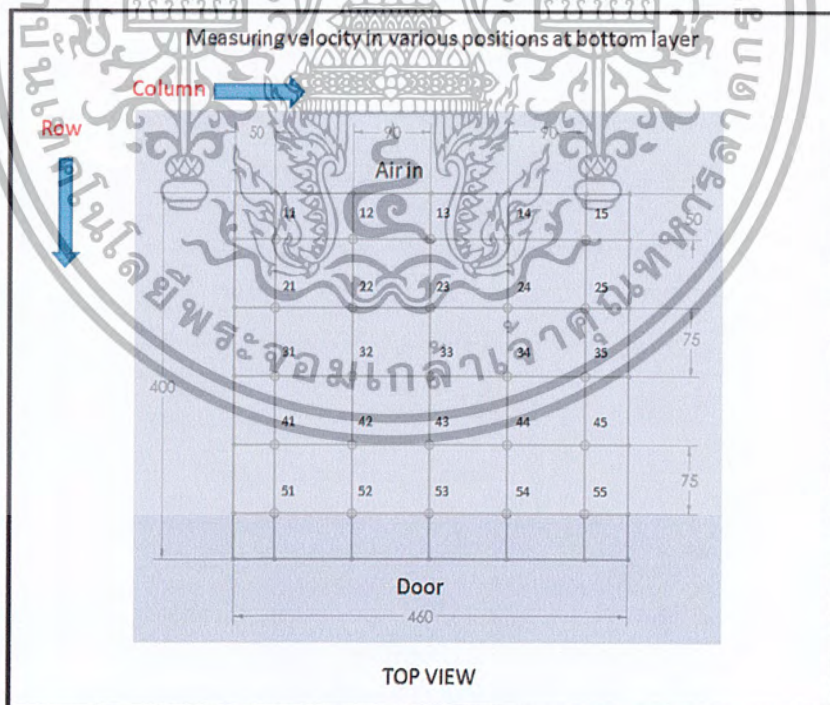
ในการทดลองนี้ทำการทดลองใน 2 รูปแบบ

- วัดค่าความเร็วลมโดยใช้เครื่องมือวัด Anemometer ตามรูปที่ 3.17
- หาทิศทางของความเร็วลมโดยใช้ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อหาทิศทางการไหล

ในการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อนำผลที่จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม โดยที่ได้ทำการทดลองวัดค่าความเร็วลมที่จุดต่างๆภายในเตาอบ โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมตามจุดต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบขึ้นมา ดังรูปที่ 3.18 โดยได้ออกแบบวัด 25 จุดในระนาบเพลาล่างของเตาอบ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ ซึ่งเป็นขนาดของความเร็วของลมในระนาบล่าง จากนั้นคิดรูปแบบการทดลองหาทิศทางของความเร็วของอากาศที่ไหลภายในตู้อบ โดยให้ความสำคัญกับระนาบพื้นล่าง ด้วยการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองขึ้นมา และทำการทดลองเพื่อหาทิศทางของการไหลของอากาศที่ระนาบพื้นล่างของเตาอบ ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งได้แบ่งระยะของแต่ละจุดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นนิ้วคูณนิ้ว เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองที่ได้จากโปรแกรม

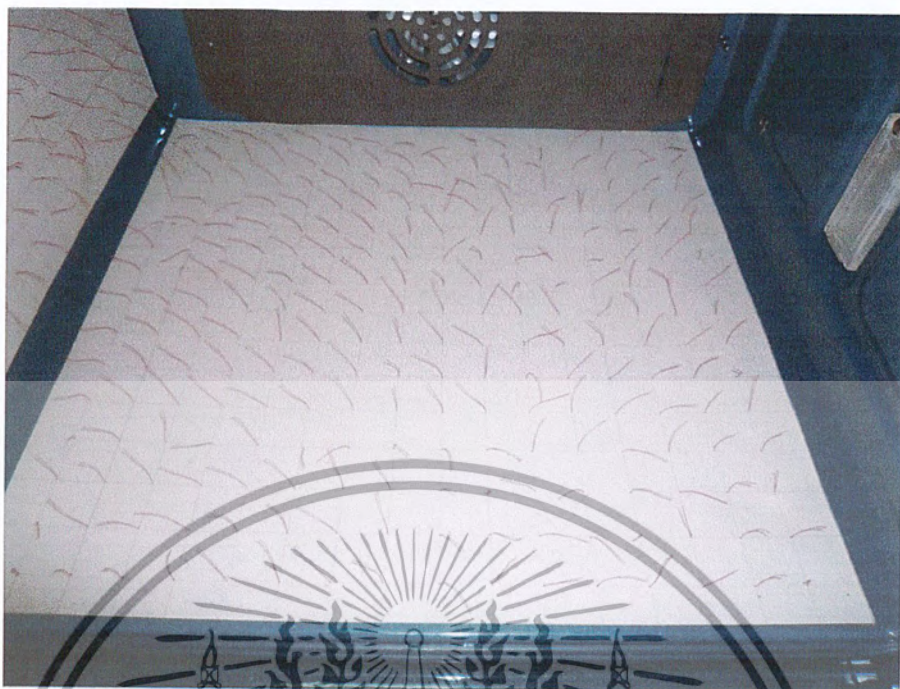


รูปที่ 3.17 แสดงเครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล (Anemometer)



รูปที่ 3.18 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วลมบริเวณระนาบพื้นล่างของเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงอุปกรณ์ทดลองหาแนวโน้มทิศทางการไหลของอากาศ

หลังจากนั้นทำการทดลองเทียบผล กับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นทำการหาการกระจายตัวของอากาศในรูปแบบอื่น ๆ ที่แตกต่างกันต่อไป โดยทำการเพิ่มพื้นที่ทางเข้าและทางออกของของอากาศในช่องเดอบรูปแบบดั้งเดิม ดังแสดงรูปที่ 3.20 และทำการจำลองการไหลของอากาศภายในเดอบ โดยใช้โปรแกรมในรูปแบบอื่นอีก 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.21-3.23 เพื่อหาว่ารูปแบบใดสามารถที่จะทำให้การกระจายความเร็วลมของอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึงทั้งเอาอบและมีความเร็วที่เหมาะสม



รูปที่ 3.20 แสดงหน้ากากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ แบบดั้งเดิม

รูปที่ 3.21 แสดงหน้ากากทางเข้าและออกของอากาศภายในช่องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แสดงหน้ากากทางเข้าและออกของอากาศภายในห้องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 2

รูปที่ 3.23 แสดงหน้ากากทางเข้าและออกของอากาศภายในห้องเตาอบ ปรับปรุงรูปแบบที่ 3

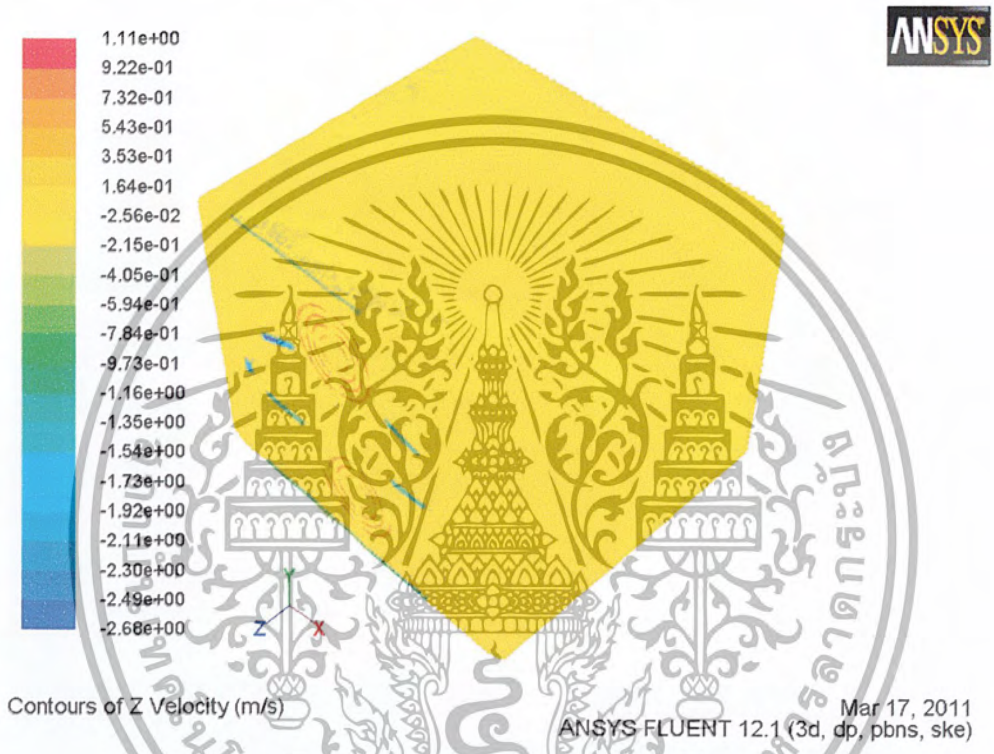
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองการไหลของอากาศแบบดั้งเดิม

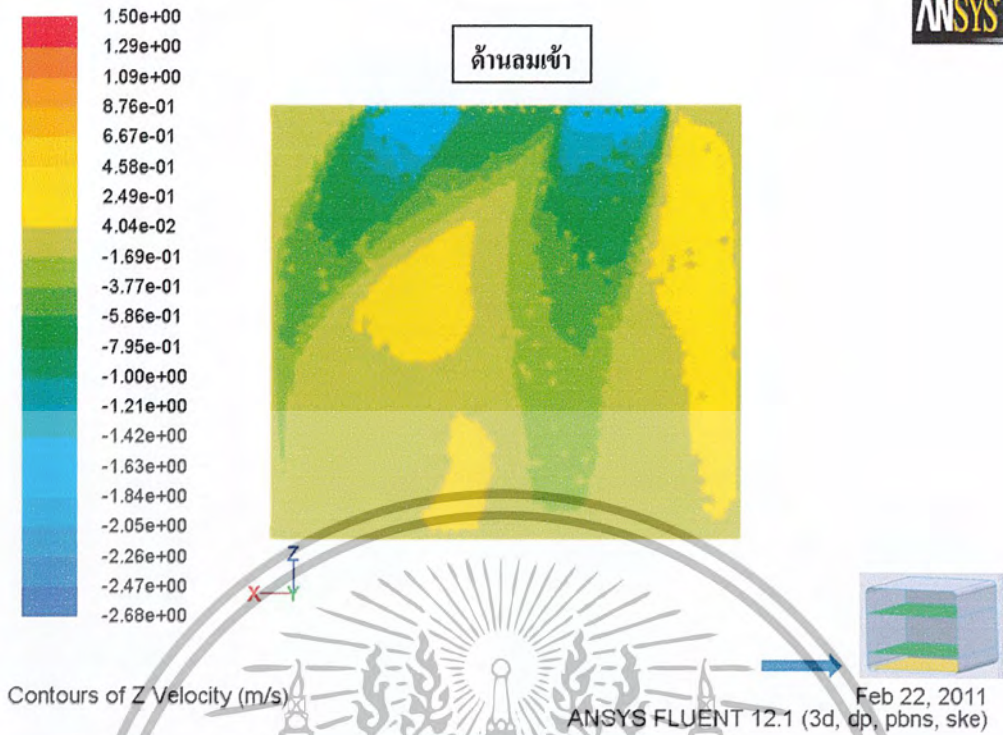
ผลจากการจำลองการไหลของอากาศแบบดั้งเดิม ตามรูปที่ 3.19 นั้น ได้ผลจากการจำลองดังนี้



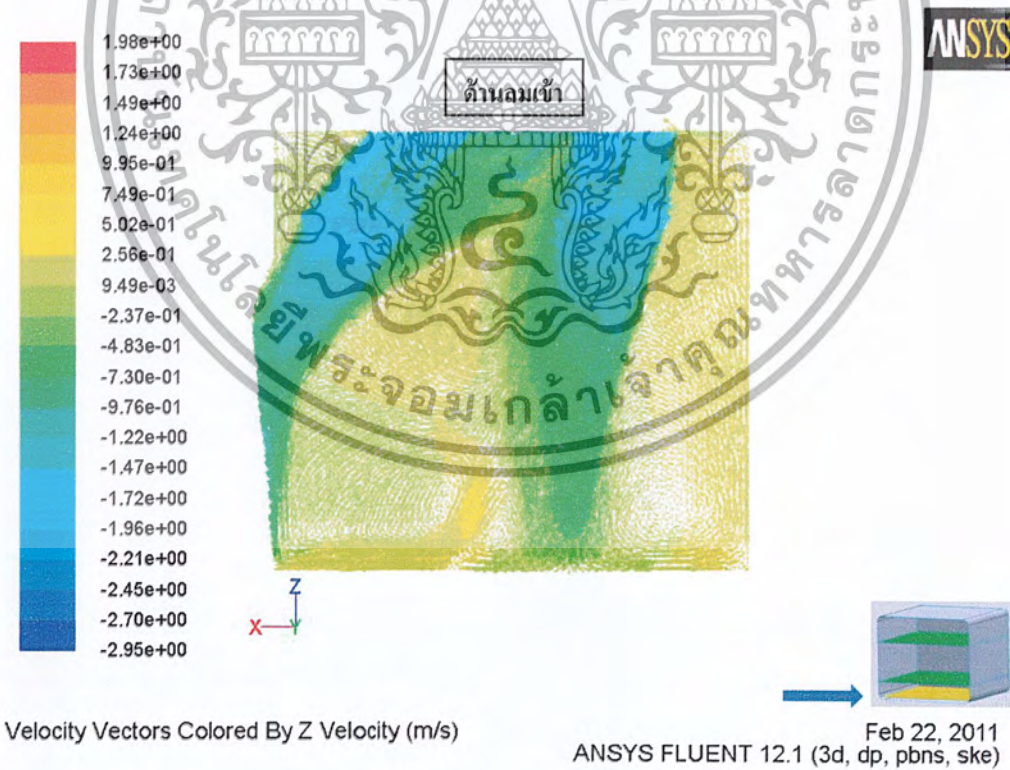
รูปที่ 4.1 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่า คอนทัวร์ของความเร็วที่บริเวณผนังส่วนใหญ่ จะมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 0.0256 – 0.215 เมตรต่อวินาที ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก และทำให้ไม่สามารถมองเห็นคอนทัวร์ความเร็วภายในเตาอบได้เลย ดังนั้นจึงได้ทำการตัดระนาบออกเป็น 3 ระนาบ ออกมาเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ คือ

- ระนาบบริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบ
- ระนาบบริเวณพัคลมด้านล่าง ซึ่งสูงจากพื้นด้านล่างขึ้นมา 80 มิลลิเมตร
- ระนาบบริเวณพัคลมด้านบน ซึ่งสูงจากพื้นด้านล่างขึ้นมา 260 มิลลิเมตร

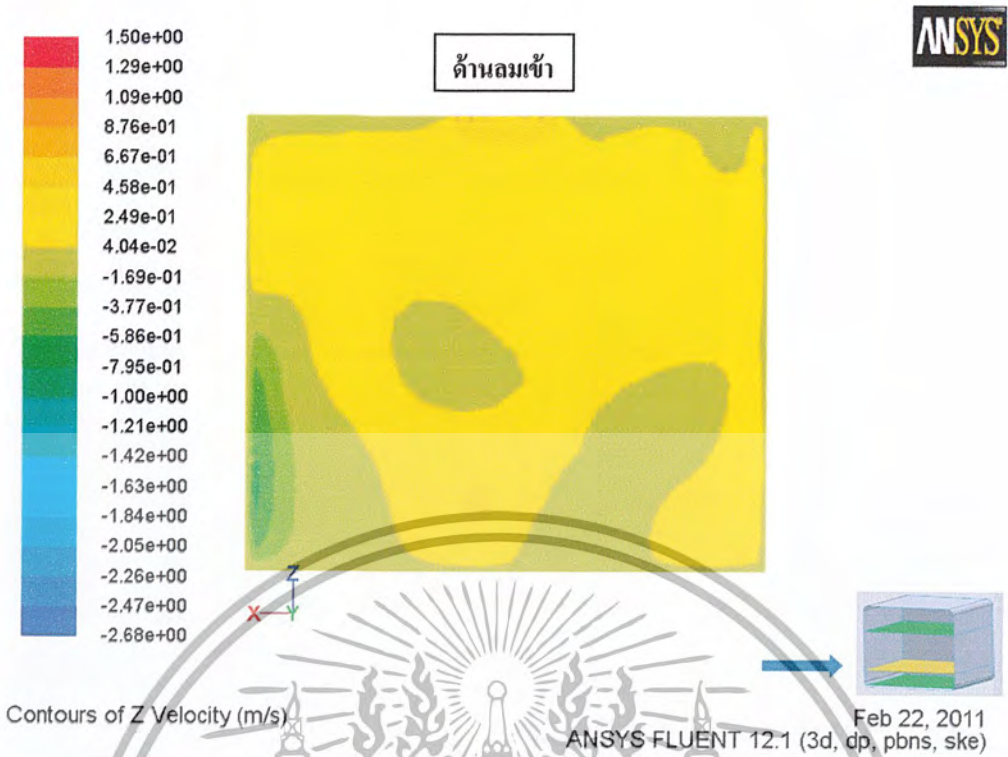


รูปที่ 4.2 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิมที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิมที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

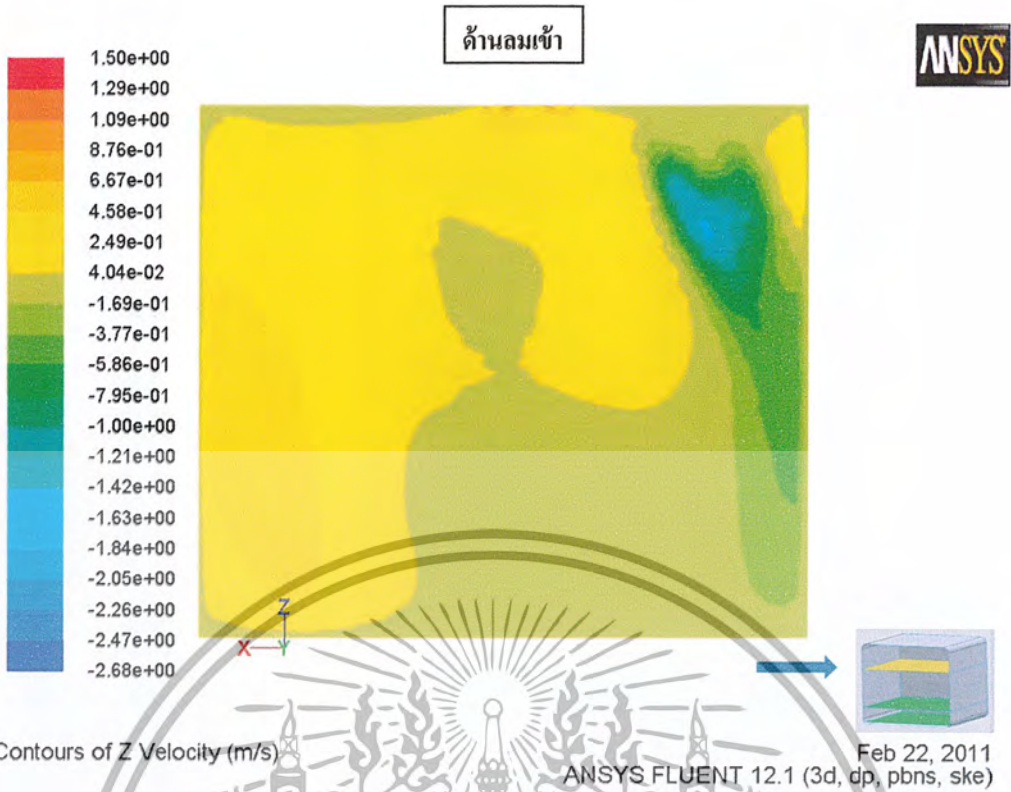


รูปที่ 4.4 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

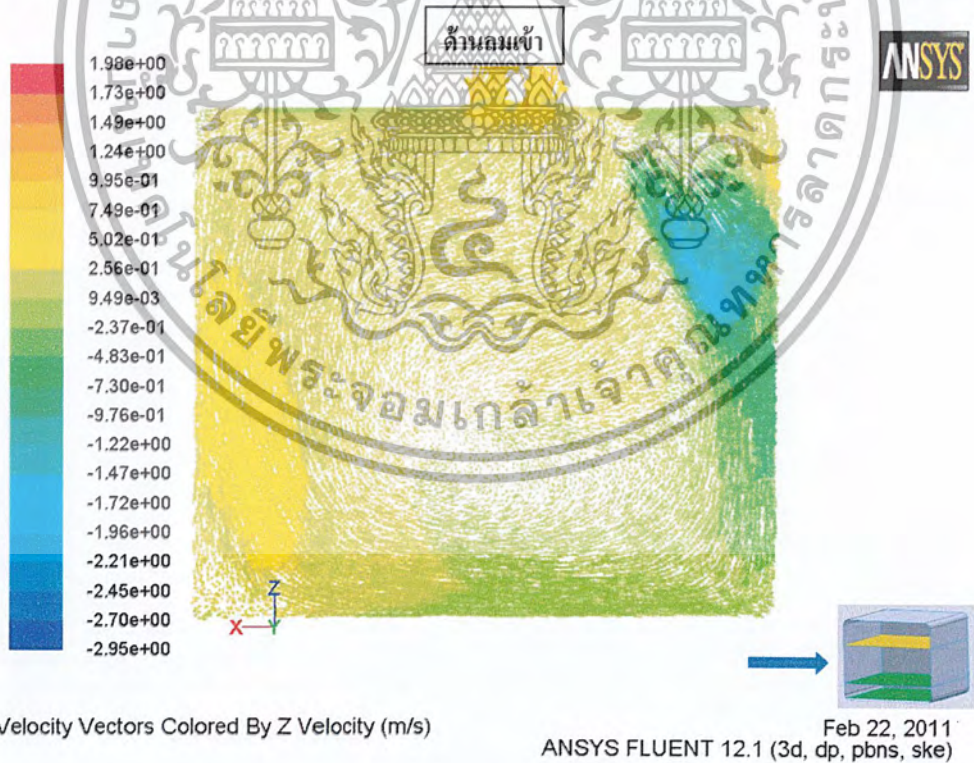


รูปที่ 4.5 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเดาอบ 260 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.7 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบดั้งเดิม ที่ความสูงจากพื้นล่างเดาอบ 260 มิลลิเมตร

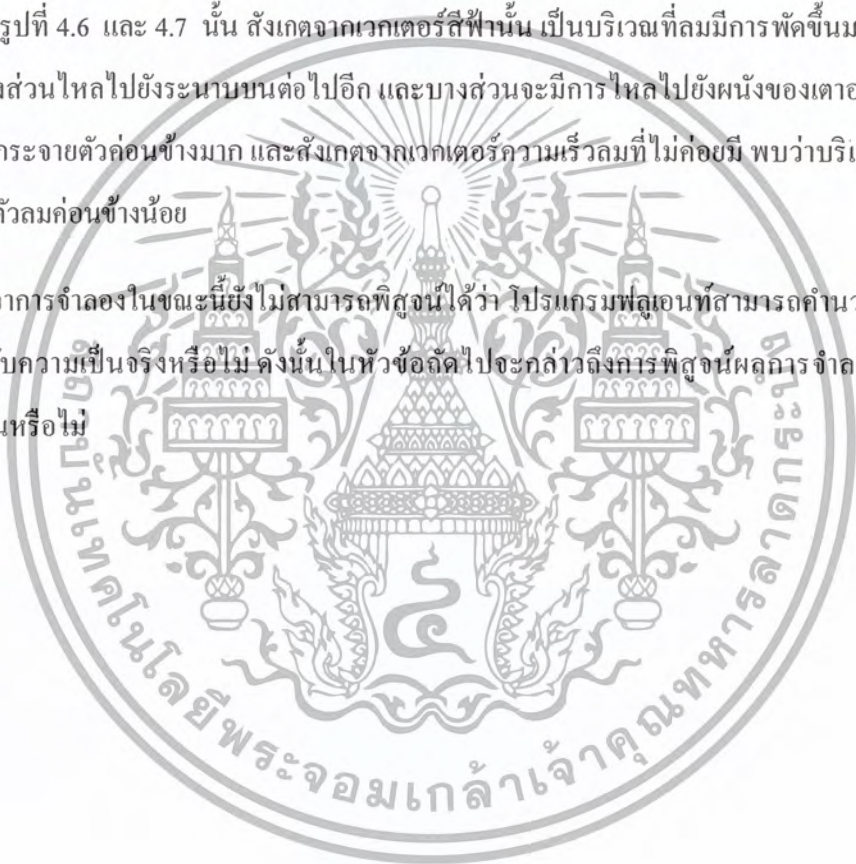
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะพบว่า ที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้านั้น จะมีลมไหลออกจากช่องลมในแนวเฉียงขวาของเตาอบ ทำให้ลมที่บริเวณดังกล่าวมีการกระจายตัวของลมที่ดี และเมื่อลมชนกับผนัง ลมจึงสะท้อนมาทางด้านหน้าของเตาอบ และลมมีการตีกลับที่บริเวณด้านหน้าของเตาอบไฟฟ้า อีกทั้งลมบางส่วนจะมีการไหลไปยังระนาบด้านบน เนื่องจากขอบด้านข้างมีความโค้ง และยังพบอีกว่า บริเวณตรงกลางของเตาอบจะมีการกระจายตัวของลมไม่มากนัก ซึ่งอาจเป็นเพราะลมมีการกระจายตัวไปยังระนาบอื่นมากกว่า

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าที่บริเวณระนาบเดียวกับพัดลมด้านล่างนั้น จะมีลมไหลออกจากเตาอบ และมีการกระจายของลมไม่มากนัก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ลมออกจากเตาอบนั่นเอง

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 นั้น สืบเนื่องจากเวกเตอร์สีฟ้า นั้น เป็นบริเวณที่ลมมีการพัดขึ้นมาขั้วระนาบนี้ และมีลมบางส่วนไหลไปยังระนาบบนต่อไปอีก และบางส่วนจะมีการไหลไปยังผนังของเตาอบ ซึ่งบริเวณนั้นจะมีการกระจายตัวค่อนข้างมาก และสังเกตจากเวกเตอร์ความเร็วลมที่ไม่ค่อยมี พบว่าบริเวณนั้นๆจะมีการกระจายตัวลมค่อนข้างน้อย

ผลจากการจำลองในขณะนี้ยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่า โปรแกรมฟลูอิดที่สามารถคำนวณออกมาได้ สอดคล้องกับความเป็นจริงหรือไม่ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการพิสูจน์ผลการจำลองว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่



4.2 ผลการทดสอบจากการวัดค่าความเร็วลม และทิศทางการกระจายลมจริง

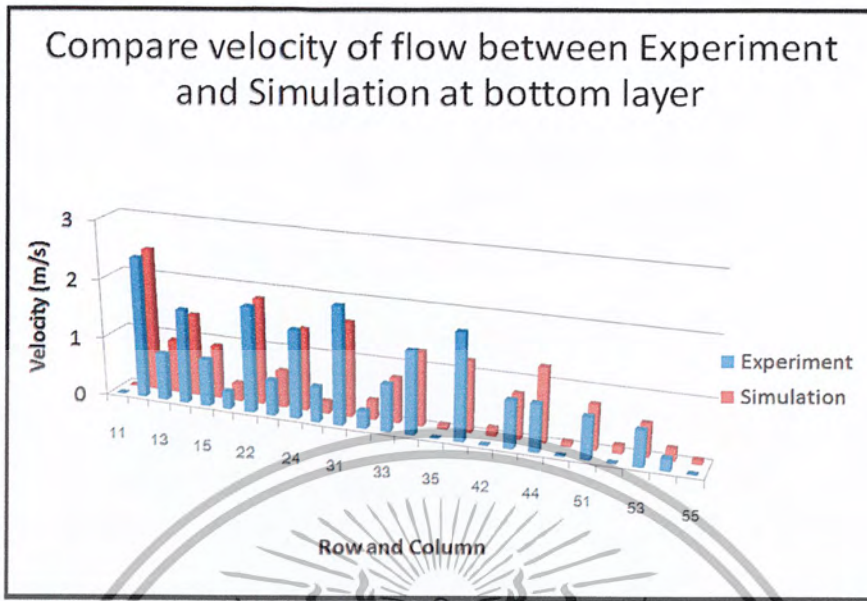
จากการจำลองการไหลไม่สามารถบอกได้ว่า การไหลดังกล่าวทดลองข้างต้นมีความถูกต้อง และสอดคล้องกับความเป็นจริงหรือไม่ ดังนั้นจึงได้ทำการพิสูจน์ผลการจำลองจากการวัดค่าความเร็วลม และคูแวนโน้มทิศทางการไหล ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงการวัดค่าความเร็วลม เปรียบเทียบค่ากันระหว่างค่าจากการทดสอบ และค่าจากการคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบทั้ง 25 จุด ตามรูปที่ 3.17

Row&Column	Experiment(m/s)	Simulation(m/s)
11	0	0
12	2.4	2.43
13	0.8	0.9
14	1.6	1.46
15	0.8	0.9
21	0.3	0.3
22	1.8	1.81
23	0.6	0.62
24	1.5	1.39
25	0.6	0.2
31	2	1.6
32	0.3	0.33
33	0.8	0.76
34	1.4	1.25
35	0	0.07
41	1.8	1.2
42	0	0.13
43	0.8	0.76
44	0.8	0.9
45	0	0.07
51	0.7	0.75
52	0	0.13
53	0.6	0.55
54	0.2	0.2
55	0	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าความเร็วลมที่ได้ มาแสดงเป็นกราฟแท่งได้ดังนี้

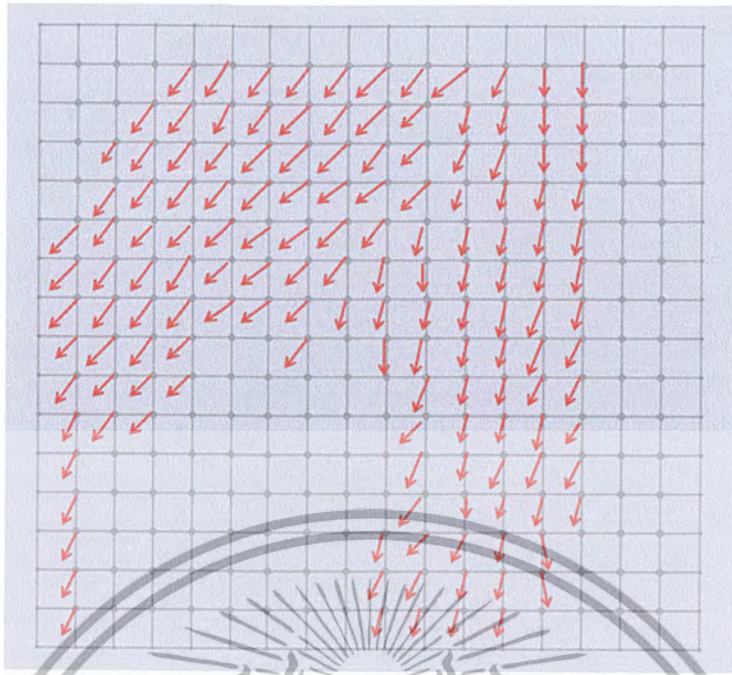


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วลมระหว่างการทดสอบ และการคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณพื้นล่างของเตาอบทั้ง 25 จุด ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 4.9 แสดงการทดลองหาแนวโน้มน้ำของทิศทางการไหลของอากาศในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



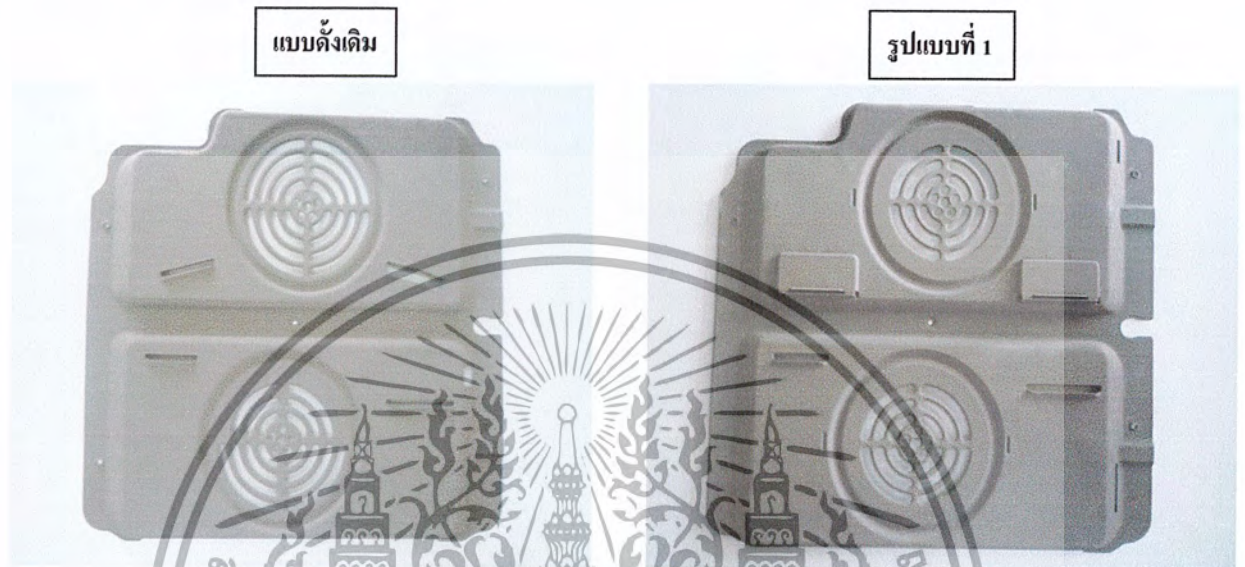
รูปที่ 4.10 ภาพแสดงทิศทางการไหลของอากาศจากการทดสอบ บริเวณพื้นล่างของเตาอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 - 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบ และค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน รวมทั้งทิศทางการไหลของอากาศก็ด้วยเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้ในรูป 4.2 และ 4.3 สำหรับรูปที่ 4.9 นั้นแสดงทิศทางการไหลของอากาศภายในบริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบ และนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 เพื่อให้มองเห็นภาพอย่างชัดเจนมากขึ้น ซึ่งพบว่าจะมีบางจุดที่ไม่ได้แสดงทิศทาง เพราะอากาศในบริเวณดังกล่าวนั้นมีค่าความเร็ว น้อยมาก และอาจเกิดลมหมุน (Eddy) ซึ่งจะไม่สามารถแสดงทิศทางได้

เมื่อสามารถพิสูจน์ได้ว่าผลการจำลองของอากาศมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบแล้ว แสดงว่าโปรแกรมฟลูเอนท์ ยังมีความเชื่อถือได้สำหรับการจำลอง จากนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงการไหลของอากาศ ซึ่งได้ปรับปรุงการไหล 3 รูปแบบ ในหัวข้อถัดไป

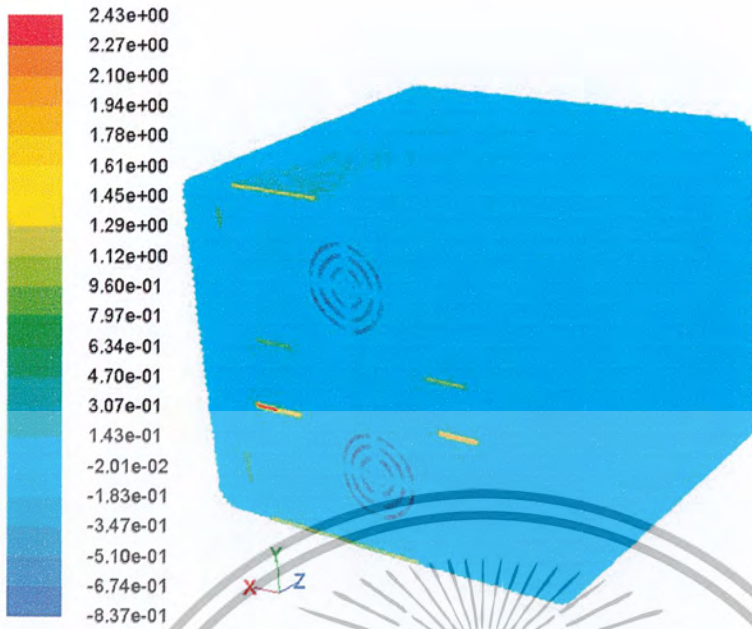
4.3 ผลการจำลองจากการปรับปรุงรูปแบบการไหลของอากาศ

4.3.1 ปรับปรุงรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.11 แสดงความแตกต่างหน้าฉากของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศ รูปแบบที่ 1

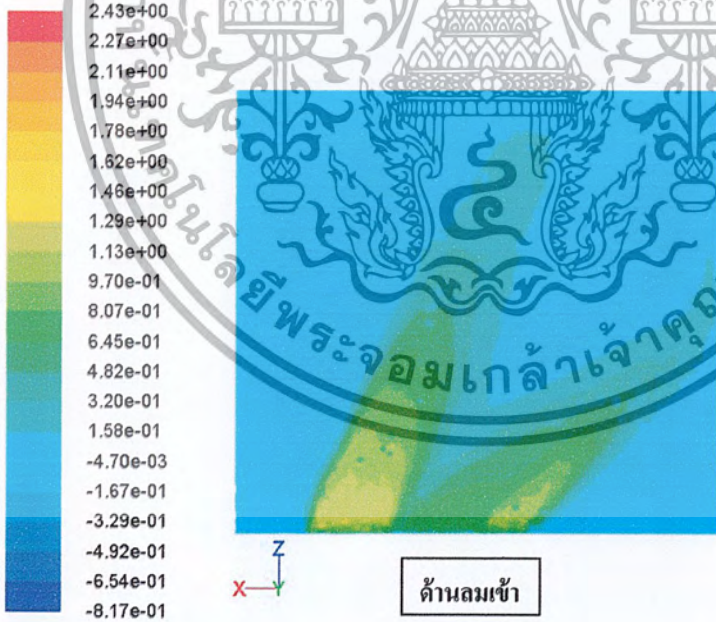
สำหรับการปรับปรุงการไหลของอากาศในรูปแบบที่ 1 นั้น ได้ทำการเพิ่มช่องเข้าของอากาศเล็ก อีก ทั้งได้ปรับให้ช่องลมเข้าให้เข้ามาภายในเตาอบแบบตรง ๆ ลดพื้นที่ช่องด้านล่าง และด้านบนของการไหล เข้ามาในเตาอบให้น้อยลง ส่วนช่องลมออกได้ปรับให้อากาศมีการไหลออกน้อยลง ผลการจำลองที่ได้แสดง ในรูปที่ 4.12 - 4.18



Contours of Z Velocity (m/s)

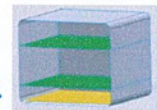
Mar 17, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, ske)

รูปที่ 4.12 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 1



Contours of Z Velocity (m/s)

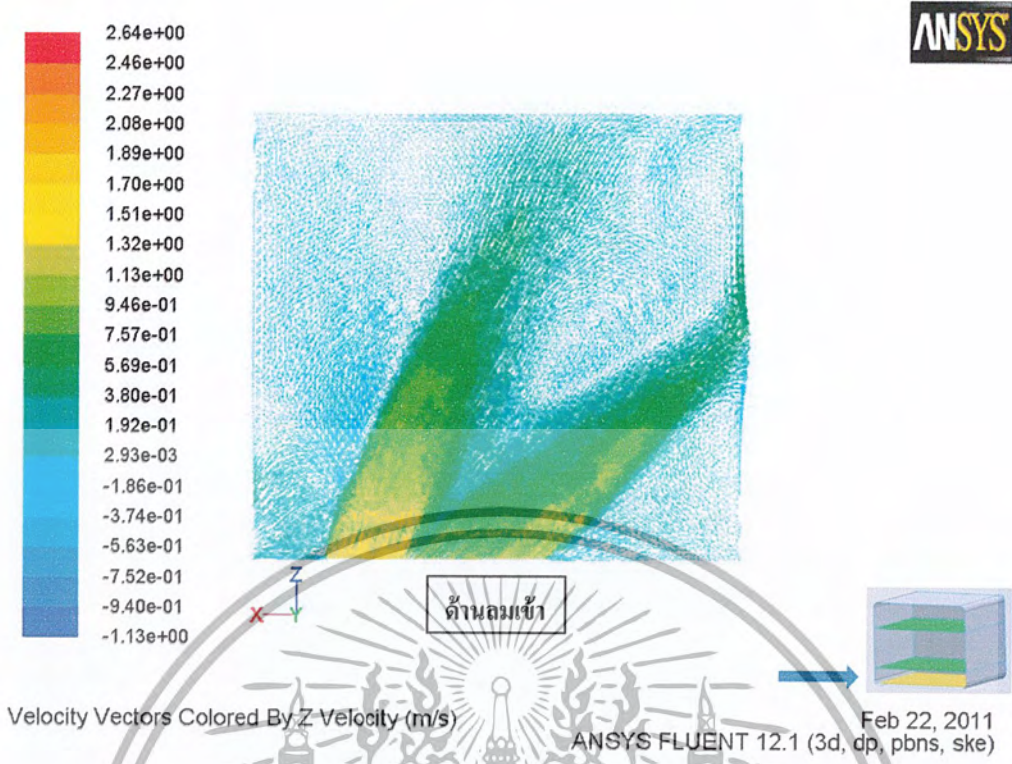
ด้านลมเข้า



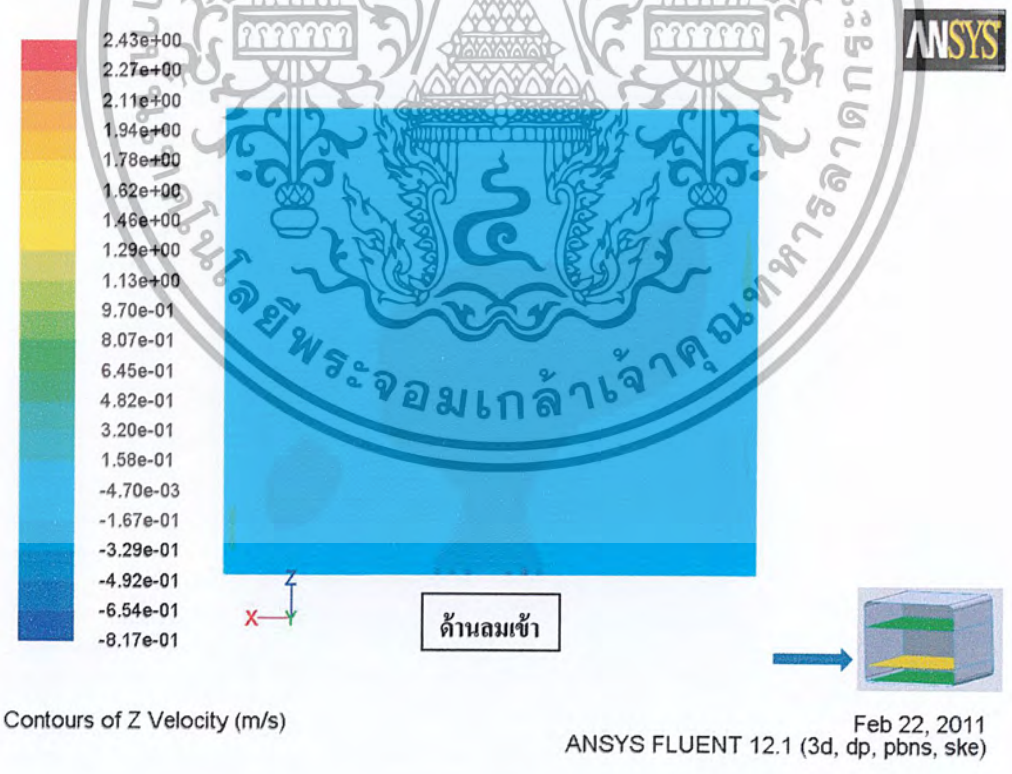
Feb 22, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, ske)

รูปที่ 4.13 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

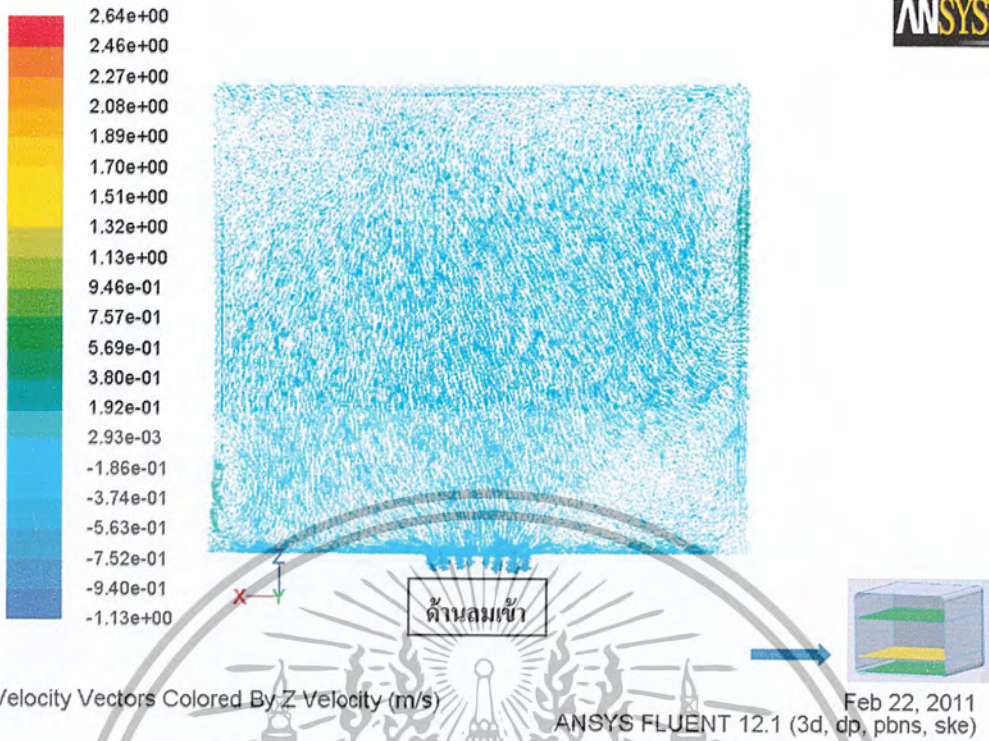


รูปที่ 4.14 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

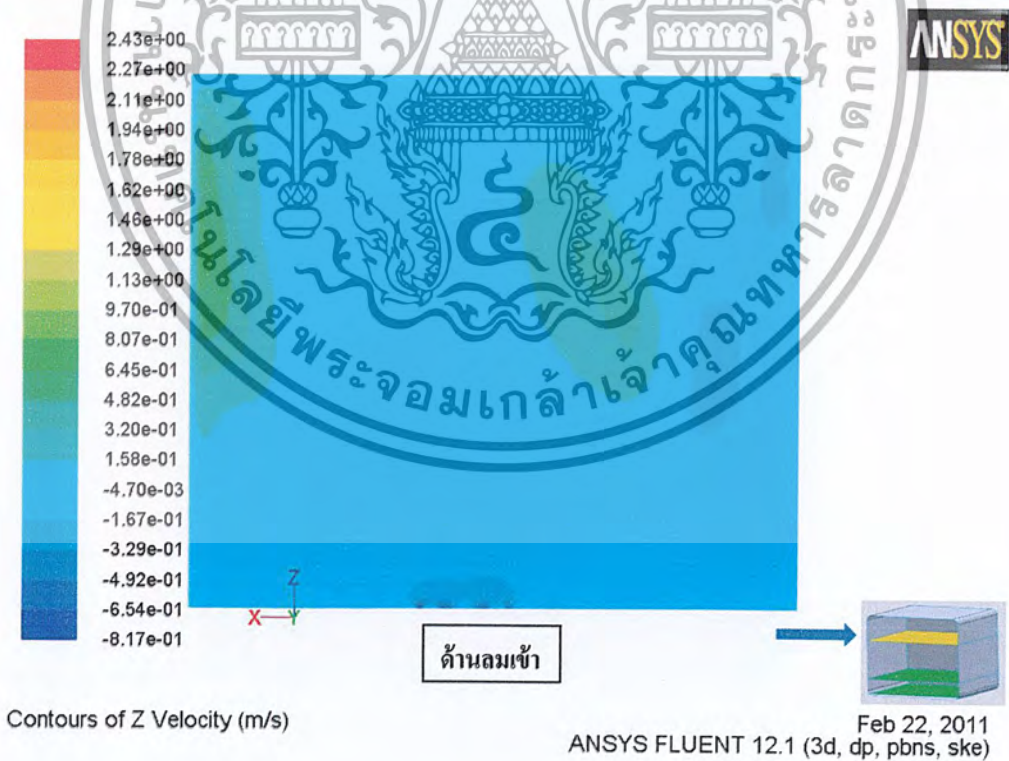


รูปที่ 4.15 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

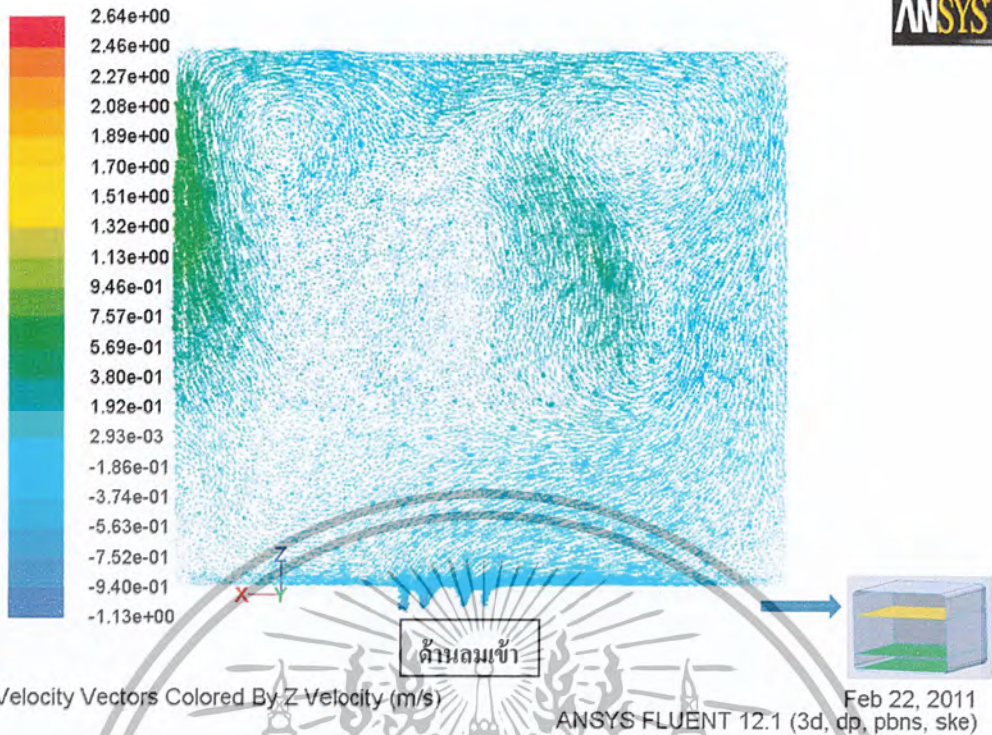


รูปที่ 4.16 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

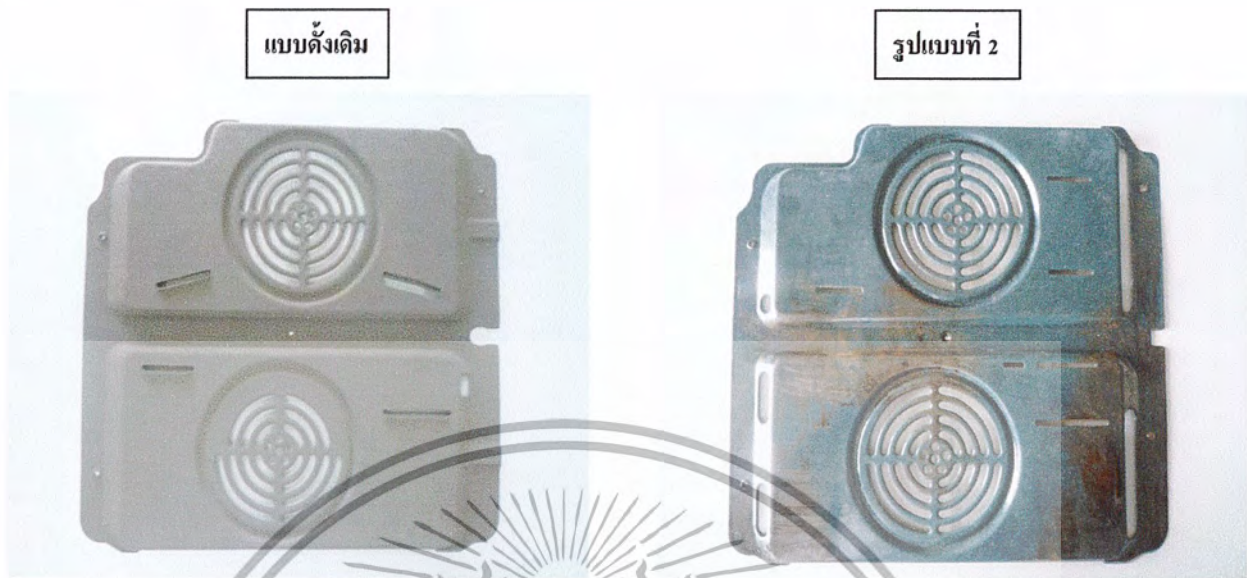


รูปที่ 4.18 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 1 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าที่ทางด้านบนเข้ามีลมออกน้อยลง เนื่องจากว่า ได้ทำการลดขนาดช่องทางด้านเข้าน้อยลง จึงทำให้อากาศไหลออกน้อยลง และการกระจายตัวของอากาศก็เบาบางลงเช่นกัน ในภาพคอนทัวร์ซึ่งจะมีสีฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมแล้ว การไหลของอากาศในรูปแบบที่ 1 ยังไม่ดีเท่าที่ควร

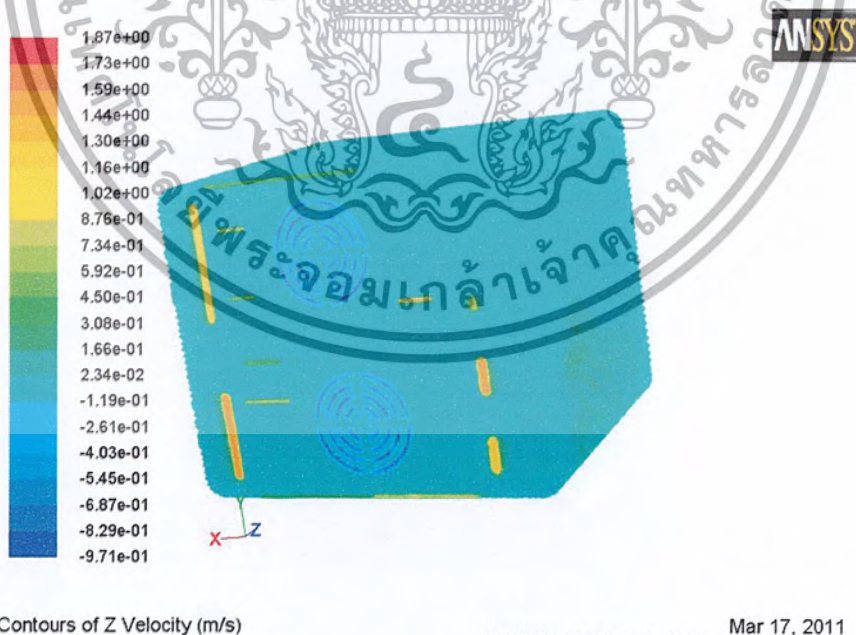
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ที่บริเวณพัดลมด้านล่างของเตาอบ จากภาพคอนทัวร์ บริเวณที่มีสีฟ้า พบว่าลมมีการกระจายตัวไม่ดีนัก อาจเป็นเพราะ มีการจำกัดการไหลเข้า และออกน้อยลง ซึ่งทำให้การไหลของอากาศมีความเบาบางเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม และรูปที่ 4.17 และ 4.18 ก็เช่นเดียวกัน เป็นบริเวณพัดลมด้านบนของเตาอบ ก็มีการกระจายตัวของอากาศเบาบาง แต่จะไปหนาแน่นที่บริเวณด้านข้างของเตาอบเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม

4.3.2 ปรับปรุงรูปแบบที่ 2



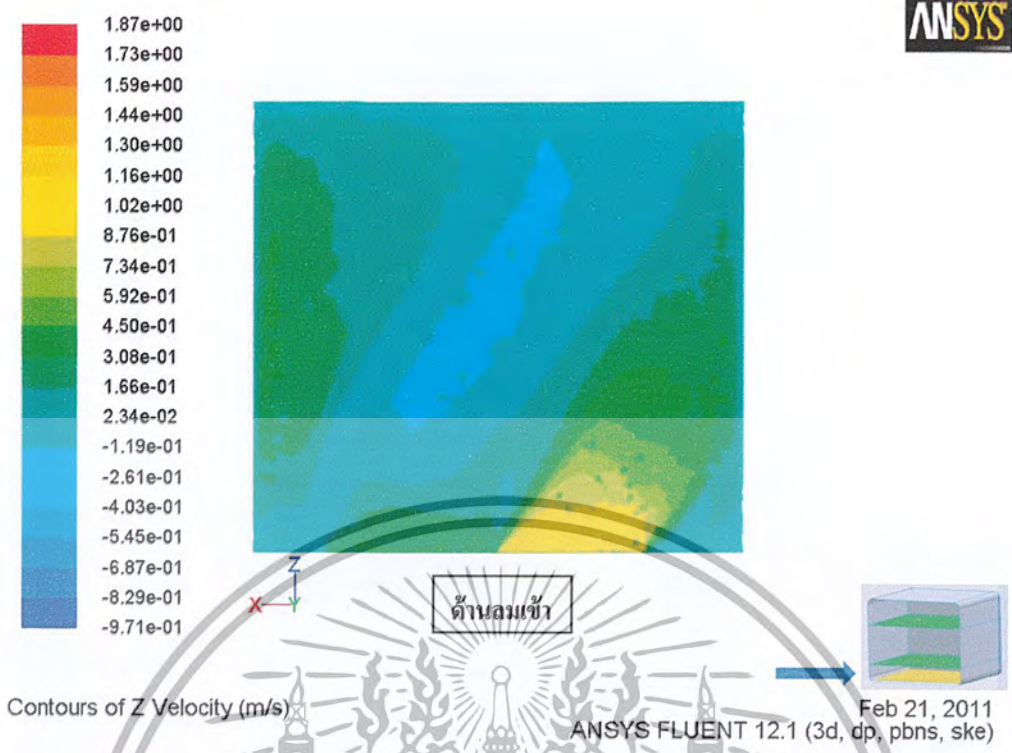
รูปที่ 4.19 แสดงความแตกต่างหน้ากาของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศ รูปแบบที่ 2

สำหรับการปรับปรุงการไหลของอากาศในรูปแบบที่ 2 นั้น ได้ทำการขยายขนาดช่องลมเข้าทางด้านข้างของเตาอบให้มากขึ้น เพื่อลดจุดอับลมบริเวณทางด้านข้างให้หมดไป อีกทั้งได้เพิ่มช่องลมออกให้มากขึ้น ทั้งพัดลมด้านล่างและด้านบนของเตาอบ ผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.20 - 4.26

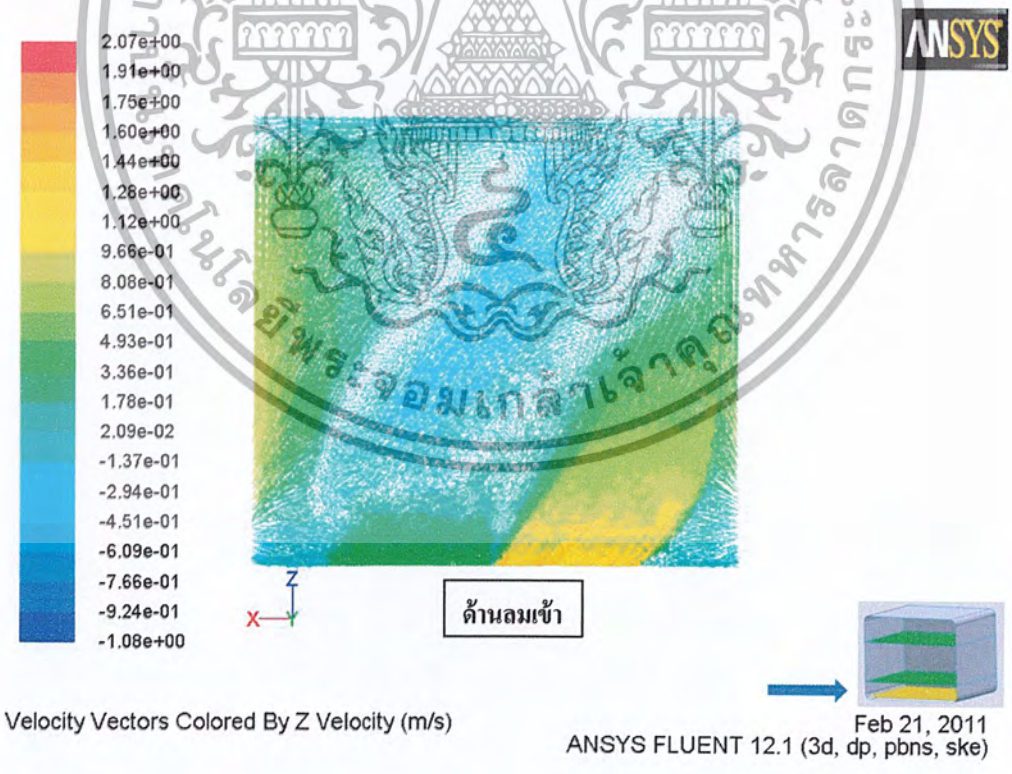


รูปที่ 4.20 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

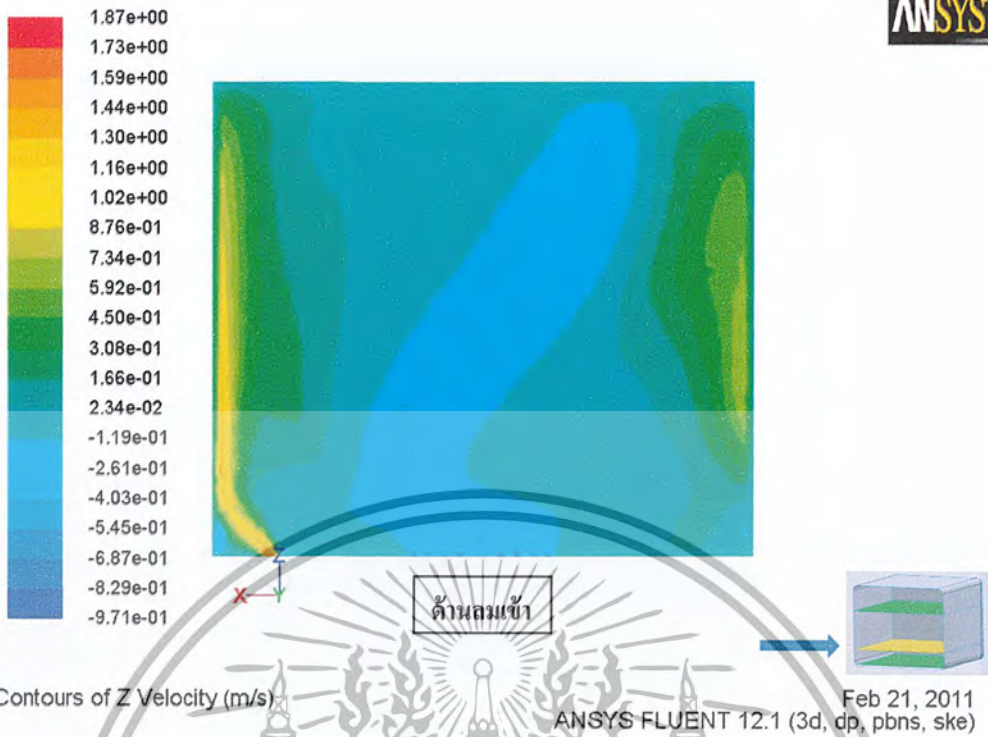


รูปที่ 4.21 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

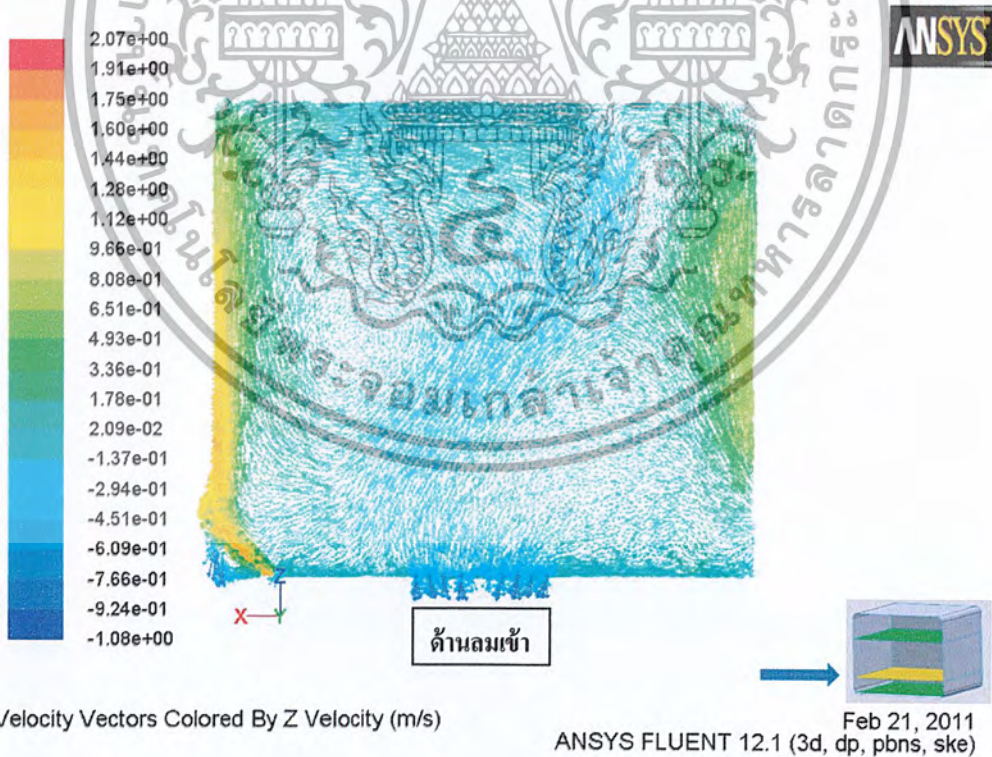


รูปที่ 4.22 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

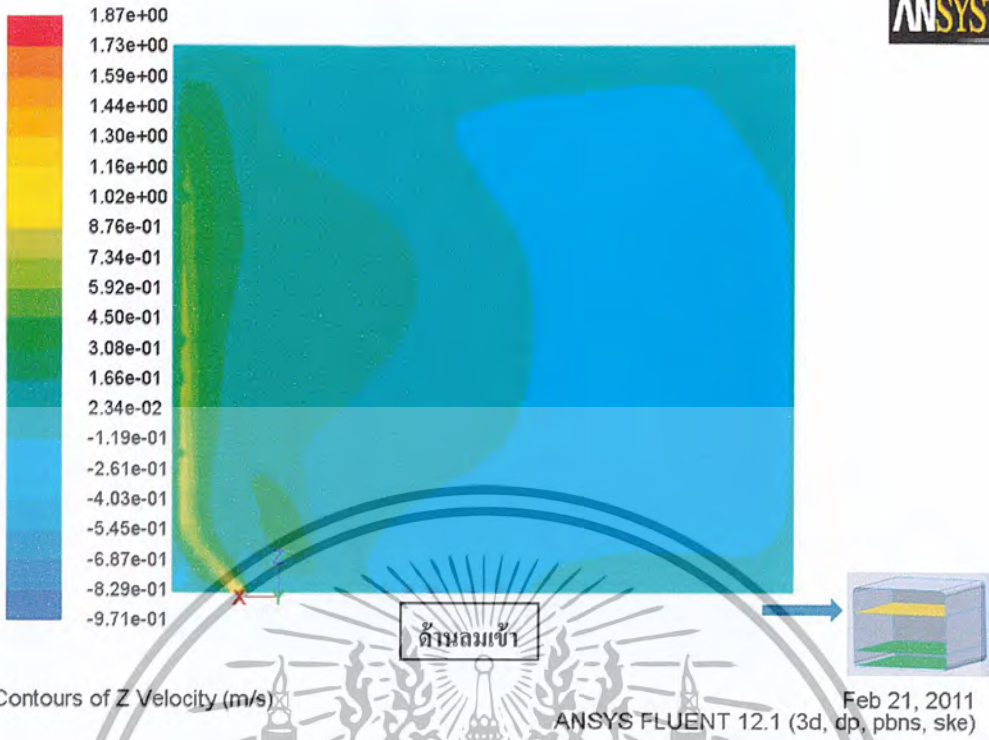


รูปที่ 4.23 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

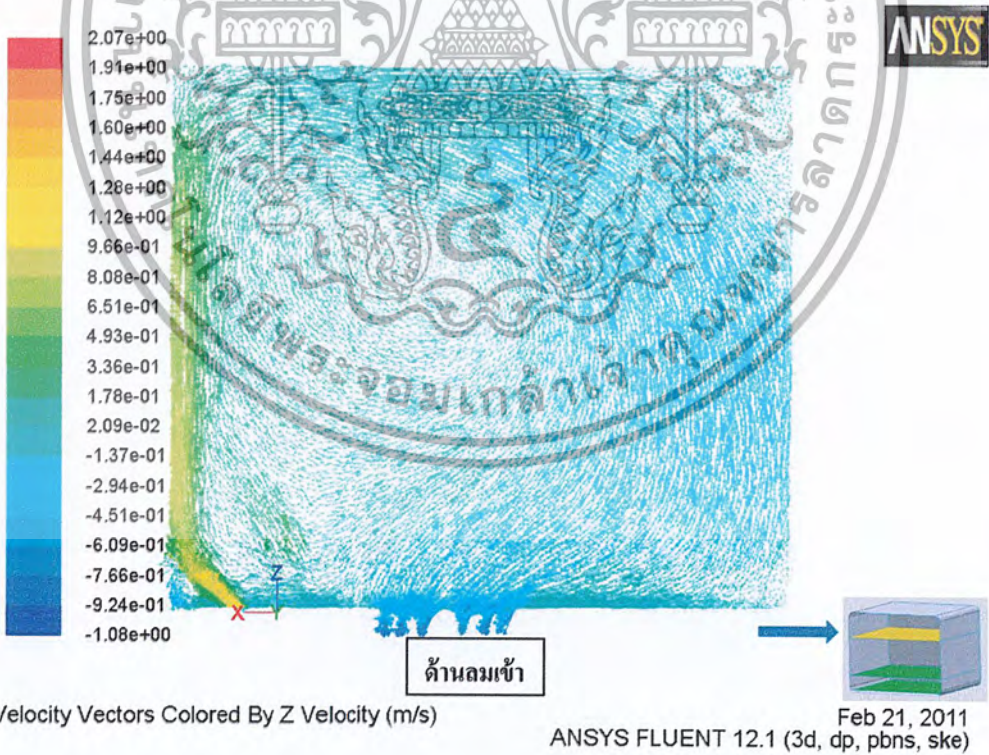


รูปที่ 4.24 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร



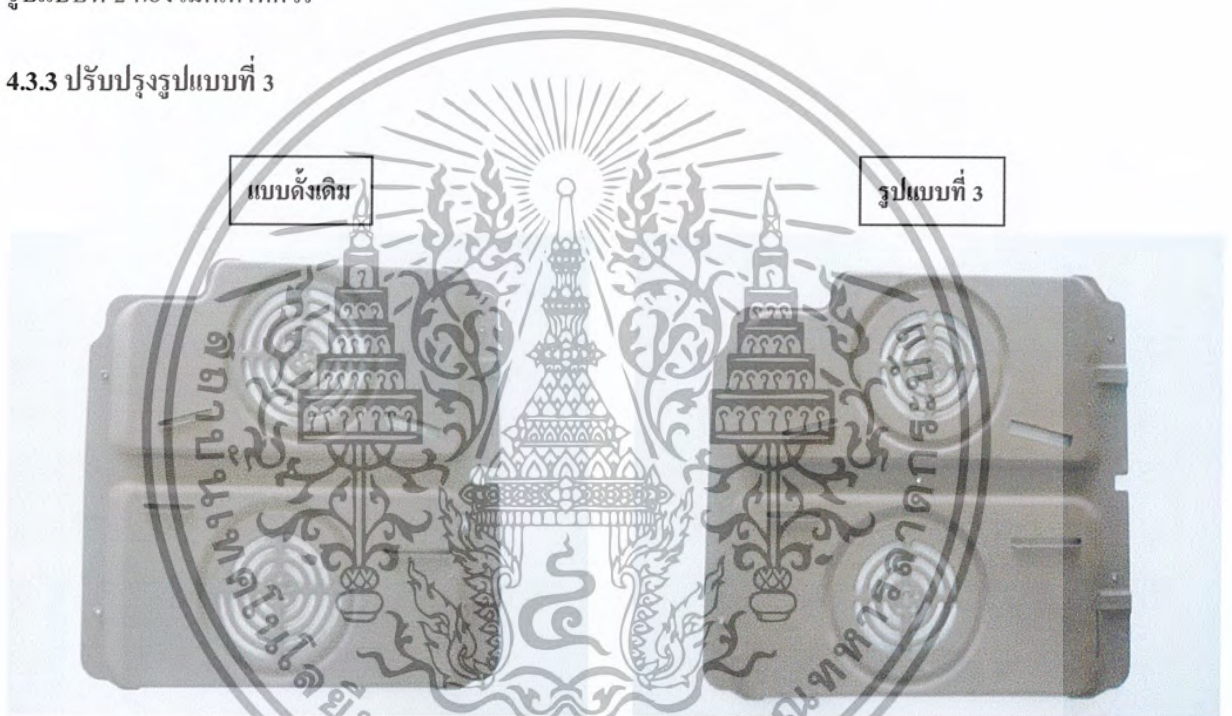
รูปที่ 4.26 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 ที่บริเวณด้านล่างของเตาอบ พบว่า เมื่อขยายทางลมออก และทางเข้าของลม นั้น ลมที่เข้ามาภายในเตาอบจะมีความเร็วมาก ตามภาพคอนทัวร์จะมีสีเหลือง ถึงแม้ว่าทางด้านข้างจะมีการไหลของลมมาก แต่บริเวณพื้นที่ที่มีสีฟ้าจะมีการกระจายตัวของลมค่อนข้างน้อย

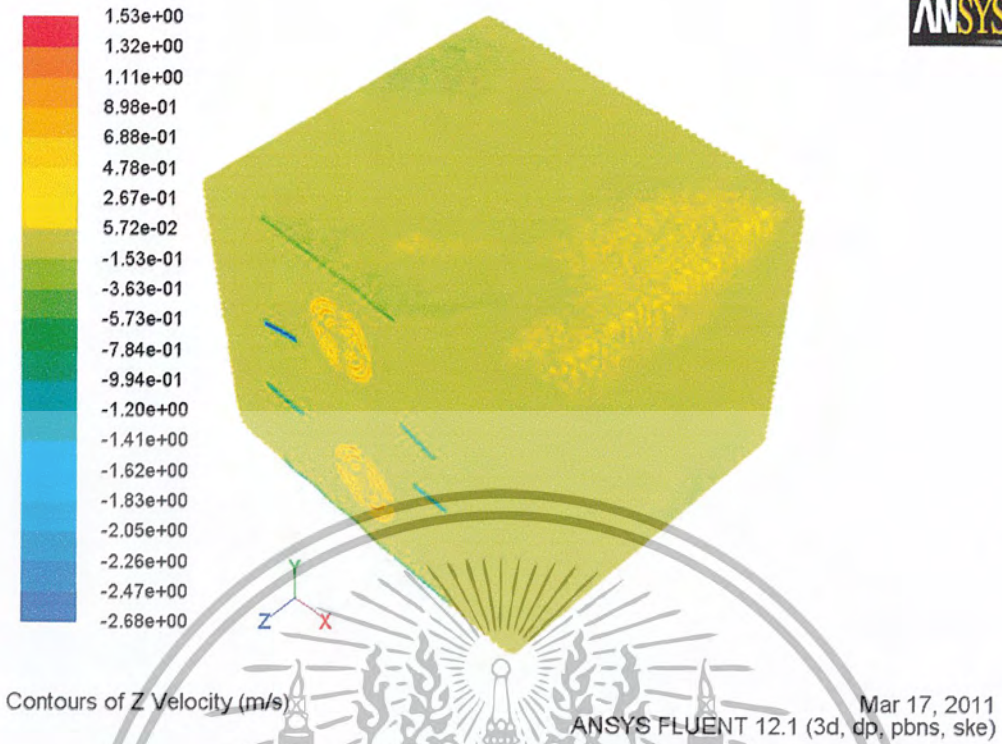
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 บริเวณพัดลมด้านล่าง พบว่าบริเวณผนังของเตาอบทั้ง 2 ด้านมีความเร็วลมมากซึ่งตามภาพคอนทัวร์จะมีสีเหลือง แต่เนื่องจากมีการกระจายตัวของอากาศที่ด้านข้างมากเกินไป ทำให้บริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวของลมที่เบาบางมาก และรูปที่ 4.25 และ 4.26 ก็เช่นเดียวกัน บริเวณส่วนกลางมีการกระจายตัวของลมที่เบาบางเช่นเดียวกัน เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมแล้วพบว่า การไหลในรูปแบบที่ 2 ก็ยังไม่ดีเท่าที่ควร

4.3.3 ปรับปรุงรูปแบบที่ 3

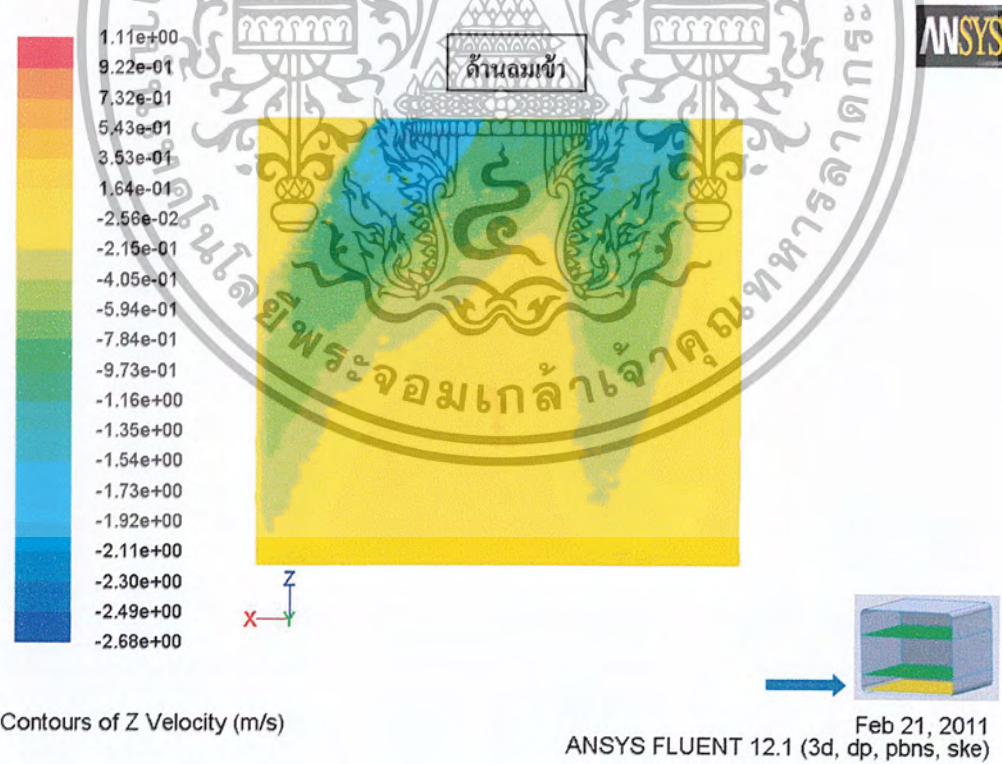


รูปที่ 4.27 แสดงความแตกต่างหน้าฉากของเตาอบที่ใช้ในการปรับปรุงการกระจายของอากาศ รูปแบบที่ 3

สำหรับการปรับปรุงการไหลของอากาศรูปแบบที่ 3 นั้น ได้ปรับปรุงการลดขนาดของช่องลมออก ให้อากาศไหลออกน้อยลง ส่วนช่องลมเข้าก็เหมือนแบบดั้งเดิม ยกเว้นตัดช่องลมเข้าทางด้านข้างออกไป 1 ช่อง ผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.28 - 4.34

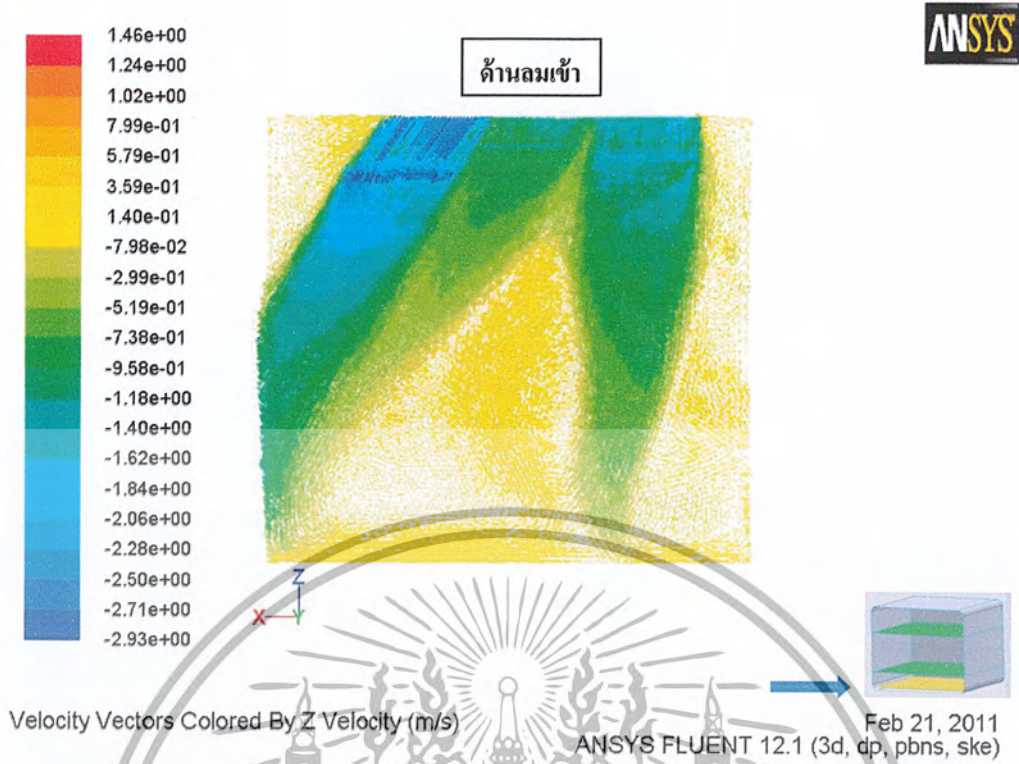


รูปที่ 4.28 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้ารูปแบบที่ 3

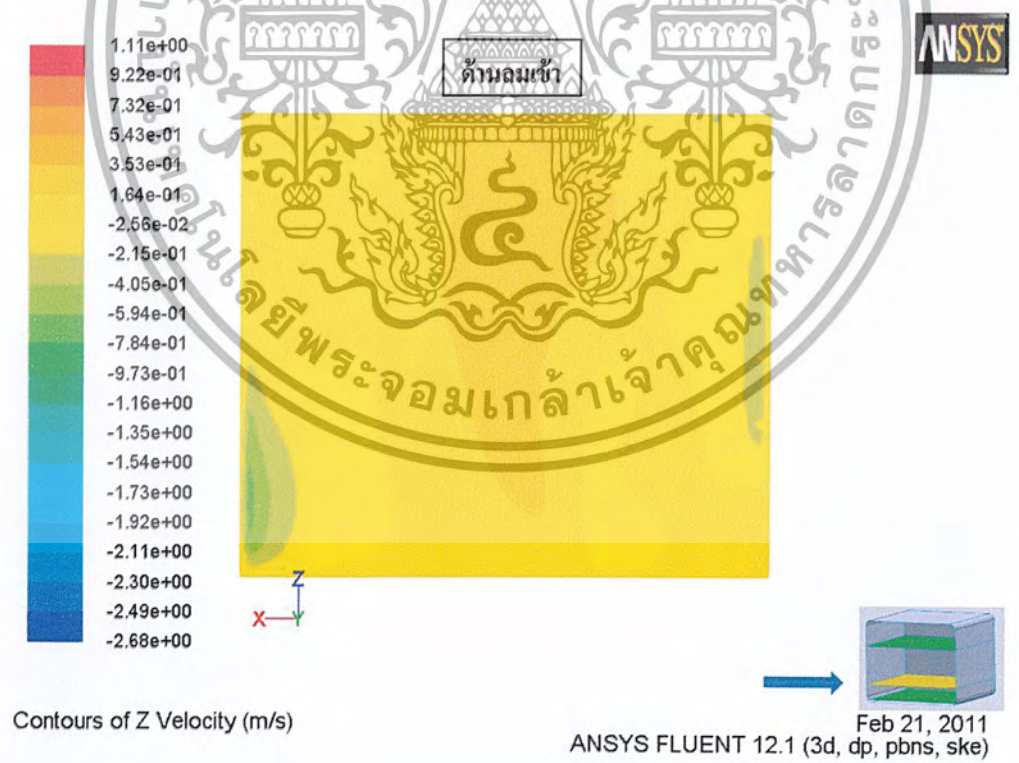


รูปที่ 4.29 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 บริเวณพื้นล่างของเตาอบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

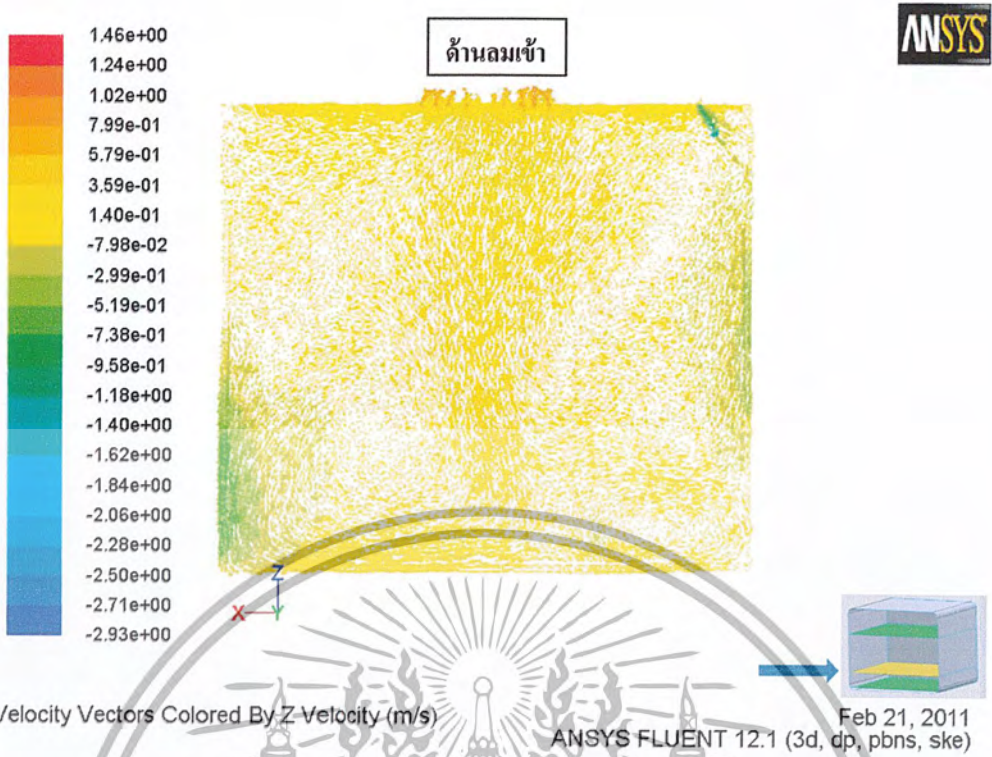


รูปที่ 4.30 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 บริเวณพื้นล่างของเตอบไฟฟ้า

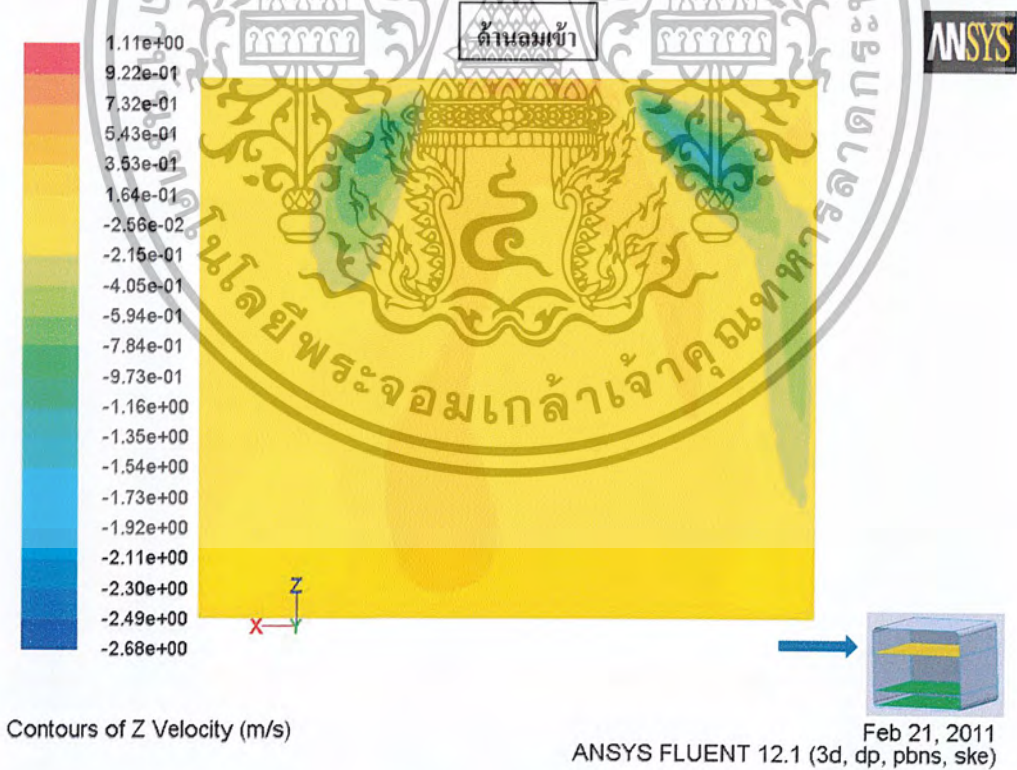


รูปที่ 4.31 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตอบ 80 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

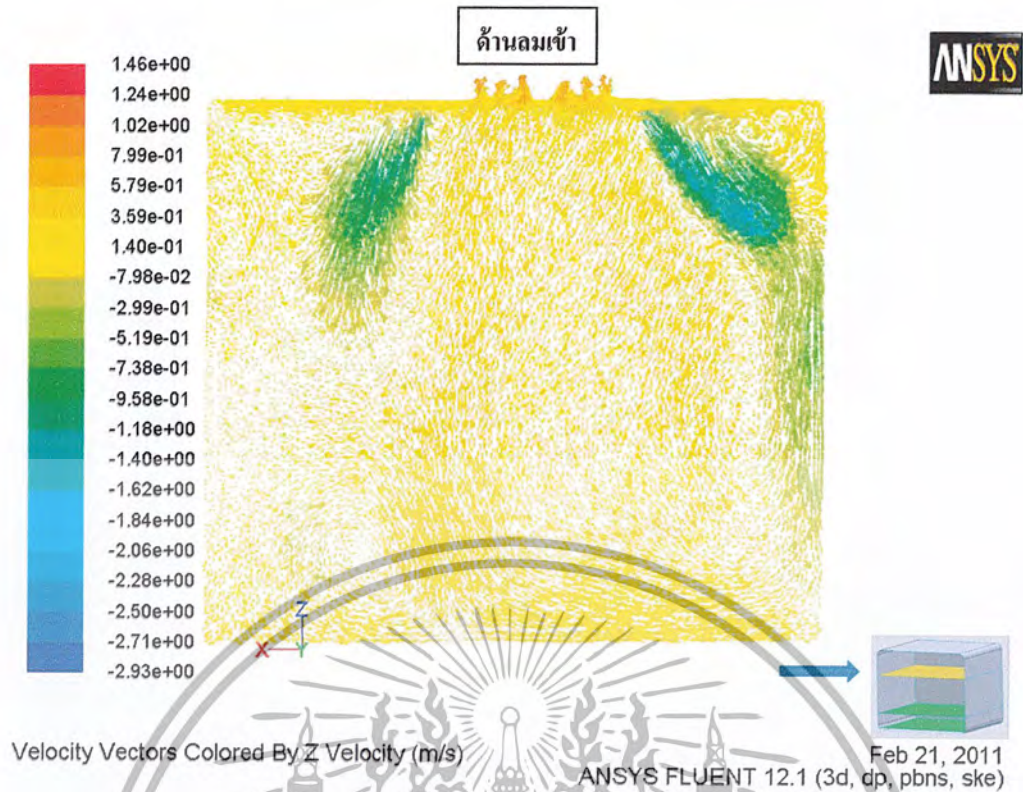


รูปที่ 4.32 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดาอบ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.33 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดาอบ 260 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

จากรูป 4.29 และ 4.30 ที่บริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบ พบว่า การกระจายตัวของอากาศมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบดั้งเดิม แต่เนื่องจากการบังคับให้ลมออกน้อยกว่าแบบดั้งเดิม ซึ่งทำให้ลมที่เข้ามาภายในเตาอบก็น้อยเช่นกัน สำหรับรูปที่ 4.31 - 4.34 ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับรูปแบบดั้งเดิม แต่จะมีการกระจายตัวของลมน้อยกว่าแบบดั้งเดิม

โดยภาพรวม ในการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการลดขนาดของช่องลมออก เพิ่มขนาดของช่องลมเข้า เพิ่มการไหลเข้าที่บริเวณด้านข้างของเตาให้มากขึ้น จะพบว่าการกระจายตัวของอากาศยังไม่ดีเท่ากับรูปแบบดั้งเดิม ดังนั้นในอนาคตการพัฒนาการกระจายตัวของอากาศจึงต้องทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศให้มากยิ่งขึ้น เพราะอาจเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง อีกทั้งยังสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้น โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ระบาย คือ ระบายพื้นล่างสุด ระบายบริเวณพัลคมด้านล่าง และระบายบริเวณพัลคมด้านบนของเตาอบไฟฟ้า ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองนั้นอากาศภายในเตาอบที่ระนาบด้านล่างสุดจะมีการไหลที่เฉียงออกด้านข้าง เพราะพัลคมมีการพัดในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาทำให้ลมมีการเฉียงออกทางด้านขวาของเตาอบนั่นเอง และสังเกตจากการไหลที่พื้นล่างสุดของทั้ง 3 รูปแบบก็มีการไหลเช่นเดียวกับแบบดั้งเดิม เมื่อลมไหลเข้ามาภายในเตาอบแล้ว ลมก็จะปะทะกับผนังด้านข้างซึ่งมีความโค้งทำให้ลมส่วนใหญ่ไหลขึ้นด้านบน ลมบางส่วนก็ไหลมายังด้านหน้าของเตาอบ แล้วตีกลับมายังด้านในของเตาอบ พบว่าจะมีความเร็วที่น้อย เพราะอาจเกิดความดันลด (Pressure Drop) ความเร็วจึงมีค่าลดน้อยลงมากที่บริเวณตรงกลางของเตาอบ ส่วนพัลคมทั้งด้านล่าง และด้านบนทำหน้าที่ดูดอากาศภายในออกจากเตาอบไฟฟ้า จากผลการจำลองในภาพที่แสดงเวกเตอร์ความเร็วบริเวณที่มีสีขาวสามารถอธิบายได้ว่า บริเวณดังกล่าวนี้จะมีการกระจายตัวของอากาศค่อนข้างน้อย ซึ่งอาจหมายถึงมีการพาความร้อนค่อนข้างน้อย เมื่อมีการพาความร้อนน้อย บริเวณนั้นจึงถือว่าเป็นจุดอับของความร้อน (Dead Zone) ในทางกลับกันบริเวณที่มีเวกเตอร์ความเร็วหนาแน่น อาจกล่าวได้ว่าบริเวณนั้นมีการพาความร้อนมาก เมื่อมีการพาความร้อนมาก บริเวณนั้นจึงถือว่าเป็นจุดที่มีความร้อนมาก (Hot Spot) เมื่อวิเคราะห์ว่าจุดใดเป็นจุดอับ และจุดใดเป็นจุดที่มีความร้อนมาก จึงได้ทำการปรับปรุงการไหลของอากาศให้มีการกระจายตัวของอากาศได้อย่างทั่วถึง

สำหรับการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการไหลของอากาศมีความสอดคล้องกันหรือไม่ ในที่นี้ได้ทำเฉพาะบริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบเท่านั้น พบว่าการทดสอบหาค่าความเร็วของการไหลส่วนใหญ่มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับการทดสอบ รวมทั้งทดสอบการหาทิศทางของการไหลก็พบว่าทิศทางการไหลก็มีความสอดคล้องเช่นเดียวกับการทดสอบ ดังนั้นในอีก 2 ระบายที่เหลือก็มีแนวโน้มการไหล และค่าความเร็วที่สอดคล้องเช่นเดียวกัน เนื่องจาก โปรแกรมมีการคำนวณที่ใช้สมการเดียวกันทั่วทั้งเตาอบ สรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองฟลูอิดที่มีความเชื่อถือได้

ในการปรับปรุงการไหลของอากาศในรูปแบบที่ 1 ได้ทำการเพิ่มช่องเข้าของอากาศเล็ก อีกทั้งได้ปรับให้ช่องลมเข้า ให้เข้ามาภายในเตาอบแบบตรงๆ ลดพื้นที่ช่องด้านล่าง และด้านบนของการ

ไหลเข้ามาในเตาอบให้น้อยลง ส่วนช่องลมออก ได้ปรับให้อากาศมีการไหลออกน้อยลง พบว่าการไหลยังมีจุดอับมากกว่าแบบดั้งเดิม อาจเป็นเพราะมีการลดการไหลออกของอากาศ จึงทำให้อากาศมีการไหลเข้ามาน้อยเช่นเดียวกัน อีกทั้งช่องการไหลเข้ามีมากเกินไป ถึงแม้ว่าจะลดขนาดช่องการไหลให้เล็กลง แต่ยังทำให้อากาศมีการกระจายตัวไม่ดีเท่ากับแบบดั้งเดิม

ในการปรับปรุงการไหลของอากาศรูปแบบที่ 2 ได้ทำการขยายขนาดช่องลมเข้าทางด้านข้างของเตาอบให้มากขึ้น เพื่อลดจุดอับลมบริเวณทางด้านข้างให้หมดไป อีกทั้งได้เพิ่มช่องลมออกให้มากขึ้นทั้งพัดลมด้านล่างและด้านบนของเตาอบพบว่า การไหลที่บริเวณผนังมีการกระจายตัวดีขึ้นแต่ก็ทำให้บริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวค่อนข้างน้อย อาจเป็นเพราะช่องทางเข้าของลมใหญ่เกินไป และในขณะที่เดียวกันลมก็มีการไหลออกไปมากเช่นเดียวกัน ซึ่งอีกทั้ง 2 ระบายด้านบนก็มีการกระจายของลมน้อยมาก เมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิม

ในการปรับปรุงการไหลของอากาศรูปแบบที่ 3 ได้ปรับปรุงการลดขนาดของช่องลมออกให้อากาศไหลออกน้อยลง ส่วนช่องลมเข้าก็เหมือนแบบดั้งเดิม ยกเว้นตัดช่องลมเข้าทางด้านข้างออกไป 1 ช่องพบว่า การไหลของอากาศส่วนใหญ่ก็มีลักษณะใกล้เคียงกับแบบดั้งเดิม แต่ทว่าเมื่อมีการลดปริมาณอากาศให้ไหลออกน้อยลง ก็ทำให้อากาศมีการกระจายตัวไม่ดีเท่ากับแบบดั้งเดิม

ดังนั้นในการออกแบบช่องอากาศเข้าออกนั้น ควรออกแบบให้มีการไหลเข้าและออกให้มีความสมดุล ช่องแต่ละที่นั้นควรจะออกแบบให้มีการไหลเหมาะสมกับพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน เช่น การประกอบอาหาร หากมีการประกอบอาหารที่มีความสูงจากพื้น 80 มิลลิเมตร ก็ควรจะออกแบบให้ที่ระดับความสูงนั้นมีการกระจายของลมให้ดี ทั้งนี้ปัจจัยอื่นๆ อาจพิจารณาจากขนาดของช่องเตาอบไบพัด ลักษณะการไหล ตำแหน่งของขดลวดร้อน เป็นต้น

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าผลที่ได้จากการทดลองค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำการวัดมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ และมีแนวโน้มที่จะบังทิศทางการไหลของลมอยู่บ้างขณะที่ทำการวัดลมในเตาอบ และจากการจำลองการกำหนดความเร็วเริ่มต้นและทิศทางการไหลของอากาศที่เข้าเตาอบมีความคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการจำลองด้วยโปรแกรมยังไม่สามารถที่จะทำการจำลองทิศทางของความเร็วลมที่ออกจากพัดลมได้ไม่สิ้นก

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองเทียบกับการจำลองควรวัดเครื่องวัดความเร็วลมที่มีขนาดเล็กเพื่อให้ผลที่ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น
2. ในการจำลองควรวัดผลการจำลองการหมุนของใบพัดของเตาอบด้วย เพื่อที่จะได้ทิศทางและค่าความเร็วลมที่เข้าและออกเตาอบได้อย่างอิสระและมีความแม่นยำในการจำลองมากขึ้น
3. ในการสร้างแบบจำลองเพื่อความแม่นยำในการคำนวณมากขึ้นควรมีการสร้างแบบจำลองให้มีความเหมือนจริงมากขึ้น โดยมีเหลี่ยมมุมที่มีรายละเอียดมากขึ้นตามแบบของจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กันตภณ อุคมโชคปิติ, " การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อการออกแบบหัวเผาถ่านหินผงที่มีการหมุนวนก๊าซไอเสีย ", คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553
- [2] พิรุณเกษตร, มนตรี. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพมหานคร: บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, 2550.
- [3] สอลแมน, จ.พ., การถ่ายเทความร้อน, ธ. สุนทรชัยนาคแสง. 2547, กรุงเทพมหานคร: ท็อป/แมคกรอ-ฮิล.
- [4] SAMSUNG Customer Care Center., คำแนะนำในการติดตั้งและใช้งานเตาอบไฟฟ้าแบบฝัง BF62CBST.
- [5] Verboven, P., et al., *Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven*. Journal of Food Engineering, 2000.43(2): p. 61-73.
- [6] Mistry, H., et al., *Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens*. Applied Thermal Engineering, 2006.26(17-18): p. 2448-2456.
- [7] Curcio, S., et al., *Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation*. Journal of Food Engineering, 2008.87(4): p. 541-553.
- [8] Smolka, J., A.J. Nowak, and D. Rybarz, *Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations*. Journal of Food Engineering, 97(3): p. 373-383.
- [9] *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. 2009: PathScale Corporation.
- [10] Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Wiley Asia Student Edition, 2006.

ภาคผนวก

บทความประกอบการนำเสนอโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า

Simulation air flow in electric oven

นายจรรวดี มัคคุปะ 50010216 นายณกนต์ สิทธิเสรีประทีป 50010745 และ นายปรีชาพล โพธิ์ศิริ 50010931

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รศ.ดร.ชินวัณีย์ เชียรพงษ์)

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษารูปแบบการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า ในประเด็นของทิศทางความเร็ว รวมทั้งการวิเคราะห์การกระจายของอากาศที่อยู่ภายในเตาอบไฟฟ้า โดยการกระจายตัวของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้านี้จะบอกถึงความสามารถในการพาความร้อนจากขดลวดร้อนว่ามีกระจายความร้อนได้ทั่วทั้งเตาอบหรือไม่ ในประเด็นของการจำลองอากาศจะใช้โปรแกรมจำลองการไหลฟลูเอนต์ (FLUENT) คำนวณค่าความเร็วและทิศทางของอากาศที่ไหลอยู่ภายในเตาอบโดยมีการสร้าง โดเมนของอากาศ และแบ่งโดเมนเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ จากนั้นได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต กำหนดค่าความเร็วลมที่เข้ามาภายในเตาอบ ซึ่งค่าดังกล่าวมาจากการวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ผลการจำลองที่ได้พบค่าความเร็วและทิศทางของการไหลของเตาอบไฟฟ้าก่อนการปรับปรุงที่คำนวณได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมฟลูเอนต์เปรียบเทียบกับการวัดความเร็วและการตรวจสอบทิศทางลมด้วยวิธีการทดลองบริเวณพื้นด้านล่างของเตาอบมีความสอดคล้องกัน จากนั้นได้ทำการปรับปรุงการไหลของอากาศ โดยทำการปรับปรุงการกระจายของอากาศ 3 รูปแบบ ผลจากการจำลองผลพบว่า ผลก่อนการปรับปรุงมีการกระจายตัวของอากาศดีที่สุด

คำหลัก: เตาอบไฟฟ้า การไหลของอากาศ การจำลองการไหล

Abstract

The purpose of this project is to study air flow inside the electric oven. In this research air was investigated by simulation technique which direction, distribution and velocity of air were studied. Air flow distribution could describe performance convection heat transfer inside an electric oven. The simulation of air used ANSYS FLUENT calculate direction and velocity of air flow inside it after create domain and build mesh. Then create boundary condition each components: velocity in and outflow inside the oven. The magnitude of velocity measured by anemometer. The simulated before modified results will be compared with the measurement of velocity distribution and simulation at the bottom layer found value are consistent. Then adjusted the air flow, simulated same process before modified are 3 cases. The results between adjusted 3 cases and before modified are air flow of before modified have the best performance and distribution.

Keywords: Electric oven, Air flow, Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องในทุกวินาที ส่งผลให้มีเครื่องอำนวยความสะดวกต่าง ๆ รอบตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องใช้ไฟฟ้ามีผลกระทบต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากซึ่งส่งผลให้ผู้ผลิตมีการพัฒนาสินค้าของตนให้ดียิ่งขึ้นทั้งในด้านการประหยัดพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพ รวมทั้งการเพิ่มฟังก์ชันใหม่ ๆ ของเครื่องใช้ไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งวิธีการหนึ่งของผู้ผลิตที่ใช้ในพัฒนา และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ คือ การสร้างแบบจำลอง (Simulation) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยนำผลที่ได้จากการจำลองมาทำการวิเคราะห์หาแนวทางการแก้ไข และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ตามหลักทางทฤษฎี โดยข้อดีของการสร้างแบบจำลองคือ ช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อนที่จะผลิตจริง โดยผลการจำลองสามารถบอกถึงชนิดของวัสดุที่ควรใช้ผลกระทบจากการใช้วัสดุต่าง ๆ และแนวโน้มลักษณะทางกายภาพที่อาจจะเกิดขึ้น ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาทำการจำลองต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเตาอบไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

Verboven, P., N. Scheerlinck, et al. (2000)[1] ได้ทำการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนภายในเตาอบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม CFD ซึ่งใช้การคำนวณด้วยสมการ $k - \epsilon$ ซึ่งผลการจำลองเมื่อเทียบกับการทดลองพบว่าค่าความเร็วลมมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยอยู่ 22% ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของการไหลแบบปั่นป่วนและความหนาแน่นกริดที่ใช้ในการคำนวณโดยระเบียบวิธีทางตัวเลข

Mistry, H., s. Ganapathi, et al. (2006)[2] ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการใช้โปรแกรม CFD โดยใช้พื้นฐานทางฟิสิกส์มารองรับ ซึ่งแบบจำลองได้ถูกพัฒนาโดยมีการทดลองที่แม่นยำมาสนับสนุน โดยเมื่อเทียบกับการทดลองแบบจำลองนี้ได้แสดงถึงความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% สำหรับวัฏจักรแบบทรานเซียนส์นี้

Curcio, S., M. Aversa, et al. (2008)[3] การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์แบบจำลองทางทฤษฎีในการที่จะบอกถึงการถ่ายเทโมเมนตัม ความร้อน และมวลที่เกิดขึ้นพร้อมๆกันในการที่เป็นตัวขับเคลื่อนการพาอากาศแห้งร้อนภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วนรอบ ๆ อาหารตัวอย่าง ซึ่งจากการศึกษาภายใต้สภาวะที่กำหนดพบว่าระหว่างการทำนายจากแบบจำลอง และผลที่วัดได้จริงมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมาก

Smolka, J., A. J. Nowak, et al.[4] งานวิจัยนี้ได้พิจารณาโดยใช้วิธีการทดลองให้มีความสมเหตุสมผลกับการใช้โปรแกรม CFD ในการจำลองแบบสามมิติของการไหลและกระบวนการทางความร้อนในเตาอบ โดยการหมุนวนของอากาศแบบบังคับ ซึ่งผลที่ได้คือรูปแบบของอุณหภูมิถูกทำให้ดีขึ้นซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบของตัวต้นแบบที่ได้ทำการปรับปรุง

ในการวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองพฤติกรรมของอากาศที่ไหลภายในเตาอบไฟฟ้าซึ่งจะทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในเตาอบว่ามีจุดใดที่เป็นจุดที่อากาศผ่านได้ไม่ทั่วถึงรวมทั้งการวิเคราะห์ความเร็วของลมที่ความเร็วค่าต่าง ๆ ว่าค่าของความเร็วทำไฉนจึงจะเหมาะสมในการนำไปใช้งาน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบไฟฟ้าให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้โปรแกรมเกมบิท (GAMBIT) และฟลูเอนท์ (FLUENT)
2. ศึกษาและทำการจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า
3. นำผลการจำลองการไหลของอากาศเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
4. ทำการจำลองการปรับปรุงการไหลของอากาศให้มีการกระจายตัวของอากาศดีขึ้น

1.2 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า เพื่อนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง รวมทั้งการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศ เพื่อให้มีการกระจายตัวของอากาศดีขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำการจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องสอดคล้อง ตามผลการทดลองจริง
2. ใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมได้
3. สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาต่อยอดและพัฒนาต่อไปได้
4. สามารถใช้ผลจากการจำลองทำการปรับปรุงการกระจายตัวของอากาศได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของอากาศ

2.1 ทฤษฎีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์[5]

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย คุณสมบัติต่างๆมีหน่วยตรงกันสามารถนำมาใช้ ในกรณีของการไหลบนแผ่นเพลทเรียบ ช่วงที่เปลี่ยนแปลงการไหลจากรเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน มีดังนี้

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} > 5 \times 10^5$$

u_∞ คือความเร็วกระแสไหลอิสระ, x =ระยะจากปลายขอบด้านหน้า, ρ ความหนาแน่นของไหล, μ ความหนืดพลวัต

2.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับการไหล

สมการการไหล[6]สามารถอธิบายได้ว่ามีความสัมพันธ์กับกฎการอนุรักษ์มวล และโมเมนตัมของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ซึ่งเป็นของไหลชนิดนิวตันเนียน (Newtonian Fluid) เช่น อากาศ เป็นต้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในพิกัดคาร์ทีเซียน คือ x_i ($i = 1, 2, 3$) และสามารถพิจารณาสมการได้ดังนี้

จากกฎการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

เมื่อความดันในเตาอบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ดังนั้น $\rho =$ ค่าคงที่ จึงได้

$$\frac{\partial n_j}{\partial x_j} = 0 \tag{2}$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\text{โดย } \bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \tag{4}$$

เมื่อ p เป็นความดันคงที่, $(\bar{\tau})$ เป็นความเค้นตามแนวแกน, $\rho \vec{g}$ เป็นแรงโน้มถ่วงของวัตถุซึ่งจะไม่นำมาพิจารณา, \vec{F} เป็นแรงภายนอกของวัตถุ, I คือ Unit Tensor

ในเทอมของ $\nabla \vec{v}$ จะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากของไหลไม่เกิดการอัดตัว ซึ่งความหนาแน่นคงที่ จากสมการอนุรักษ์มวล $\nabla \vec{v} = 0$ จึงได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial n_j n_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_{TOT} \left(\frac{\partial n_i}{\partial x_j} + \frac{\partial n_j}{\partial x_i} \right) \\ - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho + \frac{2}{3} \mu_{TOT} \frac{\partial n_j}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{\rho_a} f_i \end{aligned} \tag{5}$$

เมื่อ n_i ($i = 1, 2, 3$) คือ ส่วนประกอบในพิกัดคาร์ทีเซียนของเวกเตอร์ความเร็ว v (m/s), f_i คือ โมเมนตัมของแรงภายนอก คุณสมบัติอากาศที่ใช้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ซึ่งมีความหนาแน่น $\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ความหนืด $\mu_a = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ โดยมีสมมติฐานว่าเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ เพราะได้กำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ และความเร็วของอากาศมีค่าน้อยกว่าความเร็วเสียง การเปลี่ยนแปลงความดันน้อยมาก

จากสมการ $k - \epsilon$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b \\ + \rho \epsilon + Y_M + S_k \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \tag{7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ G_k คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน จากเกรเดียนท์ของความเร็วเฉลี่ยแต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากไม่ได้ทำการจำลองสมการพลังงาน

G_b คือ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนจากแรงลอยตัวแต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากไม่ได้จำลองแรงลอยตัว

Y_M คือ การเพิ่มความแปรปรวน ในอัตราการผลิตรวมแบบปั่นป่วนที่อัดตัวได้แต่ไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากเป็นของไหลที่ไม่อัดตัว เพราะมีการเปลี่ยนแปลงความดันภายในน้อยมาก

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ คือ พลาแนทินัมเบอร์

$C_{1\epsilon} C_{2\epsilon}$ และ $C_{3\epsilon}$ คือ ค่าคงที่

S_k, S_ϵ คือ source terms แต่ไม่นำมาพิจารณา

μ_t คือ ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน โดย

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

จะได้

$$\frac{\partial}{\partial t}(k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(k u_i) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_a + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \epsilon \quad (8)$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon u_i) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ = -C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของ C ในสมการ $k - \epsilon$

$k - \epsilon$	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ϵ
Standard model	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

ค่าที่ได้จากตารางมาจากการทดลองของอากาศและน้ำ สำหรับความเค้นเฉือนของการไหลแบบปั่นป่วน

สมการ $k - \epsilon$ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะมีสมการที่ 1 ซอยอยู่ 2 สมการที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีสมมติฐานให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์และไม่คิดผลของความหนืดในระดับโมเลกุล ซึ่ง k คือ พลังงานจลน์ และ ϵ คือ อัตราการกระจายตัวของของไหลแบบปั่นป่วน โดย k มาจากการหาอนุพันธ์ของ

สมการแม่นยำตรง และ ϵ มาจากสภาพทางกายภาพที่สัมพันธ์กับสมการทางคณิตศาสตร์

3. เนื้อหา

3.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเตาอบไฟฟ้า

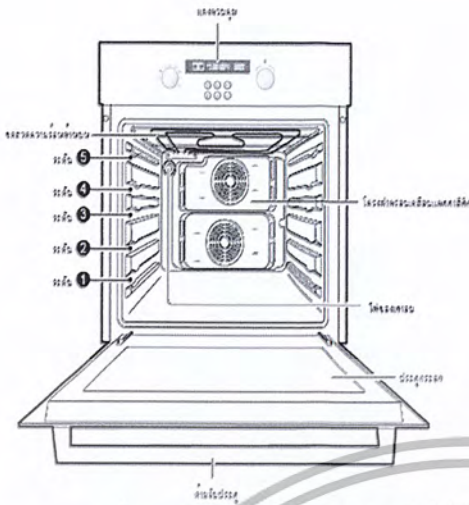


รูปที่ 1 เตาอบไฟฟ้า

เตาอบไฟฟ้าซัมซุงรุ่น BF62CBST เป็นเตาอบไฟฟ้าระบบกระจายความร้อนสองชุดที่มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายช่วยสร้างความร้อนสองระบบ ส่งผลให้ความร้อนได้มากขึ้น โดยจะทำให้ใช้เวลาการทำอาหารน้อยลง มีระบบควบคุมที่แยกการควบคุมอุณหภูมิและตั้งเวลาจากกันโดยอิสระและสามารถปรุงอาหารสองชนิดพร้อมกันได้ที่อุณหภูมิและการตั้งเวลาที่แตกต่างกันทำให้ประหยัดทั้งพลังงานและเวลาภายในเตาอบ

ตารางที่ 1 ข้อมูลด้านเทคนิคของเตาอบ SAMSUNG รุ่น BF62CBST

แหล่งพลังงาน	464×370×410มม.
ปริมาตร (ความจุที่ใช้งาน)	65 ลิตร
พลังงานเอาต์พุต	สูงสุด 3,050 วัตต์
น้ำหนัก	40 kg โดยประมาณ
ขนาดช่องของเตาอบ (กว้าง×สูง×ลึก)	440 x 365 x 405 มม.



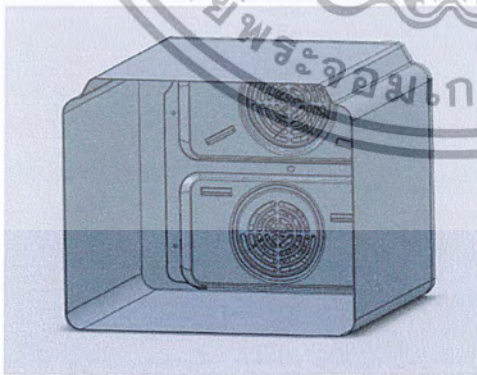
รูปที่ 2 แสดงภายในเตาอบไฟฟ้า

ภายในเตาอบจะประกอบด้วยชุดหลอดความร้อนอยู่ด้านบน ไฟเตาอบบอกสถานะการทำงานของเขา พัดลมสองตัวเพื่อกระจายความร้อนภายในเตา

3.3 การจำลองการไหลของอากาศร้อนด้วย

โปรแกรม ANSYS FLUENT

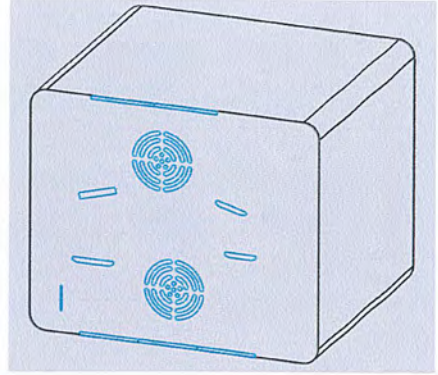
สร้างแบบจำลองโดยวัดจากขนาดจริงด้วยโปรแกรม Solid Works (รูปที่ 3) เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองเตาอบไฟฟ้าด้วย

โปรแกรม

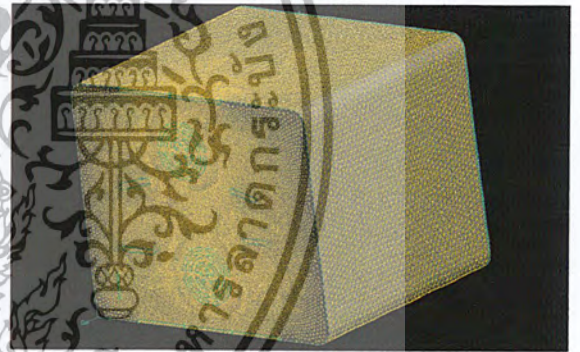
Solid Works



รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองของไหลด้วยโปรแกรม

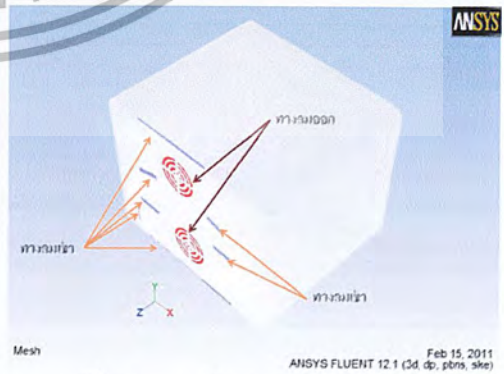
Solid Works

ขั้นตอนต่อไป สร้างเมช (mesh) ด้วยโปรแกรม Gambit (รูปที่ 5) และทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลอง (รูปที่ 6)



รูปที่ 5 แสดงการสร้างเมช (mesh) ด้วยโปรแกรม

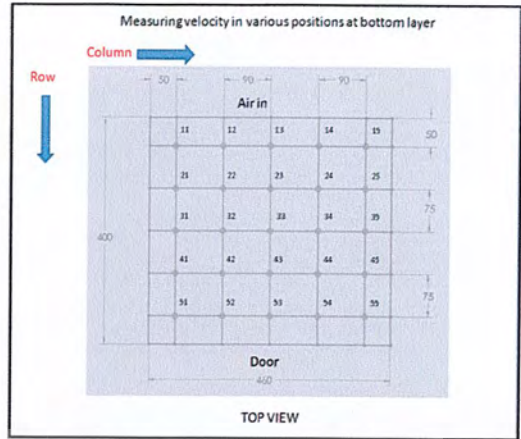
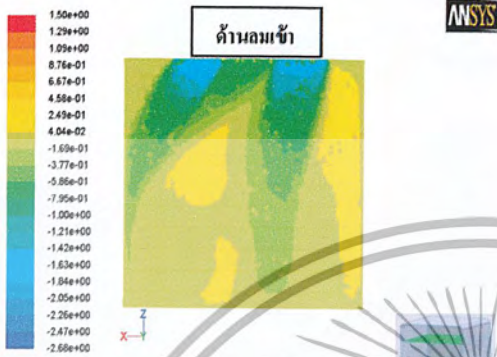
GAMBIT



รูปที่ 6 กำหนดเงื่อนไขของขอบเขตเริ่มต้น

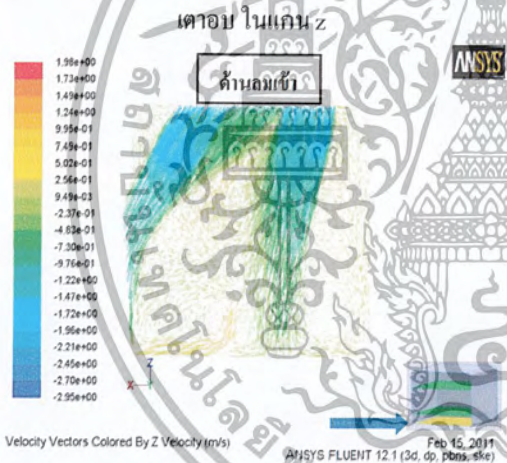
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนสุดท้าย นำแบบจำลองที่ได้ในรูปที่ 6 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent ANSYS โดยใช้คำนวณด้วยสมการ $k - \epsilon$ เพื่อหาค่าการกระจายของอากาศภายในเตาอบ

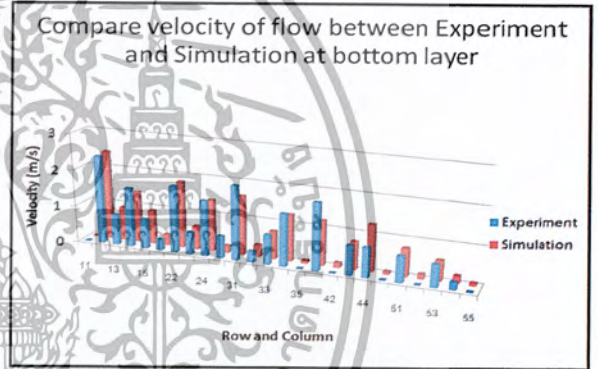


รูปที่ 9 แสดงแบบเวกเตอร์ความเร็วบริเวณพื้นล่างของเตาอบที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 7 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วบริเวณพื้นล่างของเตาอบ ในแกน z



รูปที่ 8 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วบริเวณพื้นล่างของเตาอบ ในแกน z

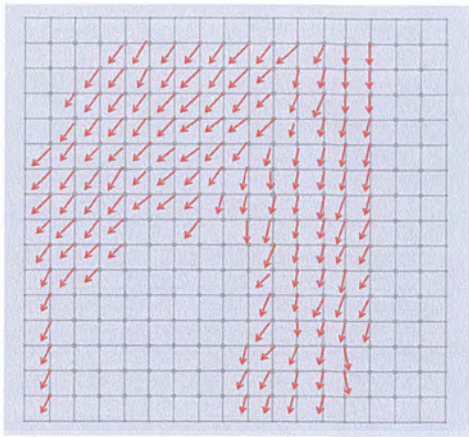


รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วกันระหว่าง การทดลองกับการจำลองที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบ

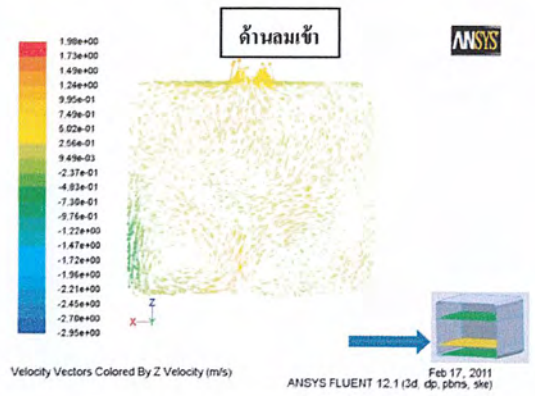
จากนั้นจึงทำการทดสอบทิศทางการไหลของอากาศโดยใช้เครื่องที่ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นมา แสดงในรูปที่ 11

จากกาทดสอบ

จากการวัดความเร็วลมของอากาศภายในเตาอบโดยแบ่งตำแหน่งการวัดในบริเวณพื้นล่างของเตาอบเป็น 25 จุด ตามที่แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งทำการวัดแต่ละตำแหน่ง 3 ครั้งแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 11 แสดงตำแหน่งบริเวณพื้นล่างของเตาอบที่ทำ
การทดสอบ

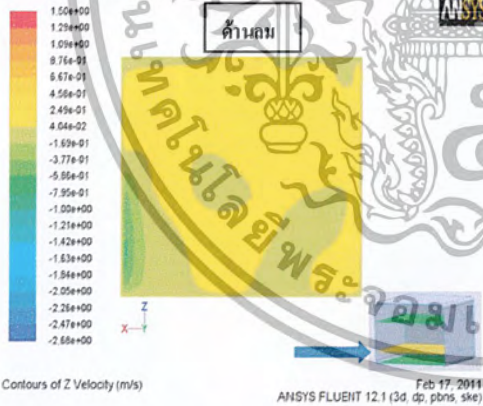


รูปที่ 13 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่าง
ของเตาอบ 80 มม. ในแกน z

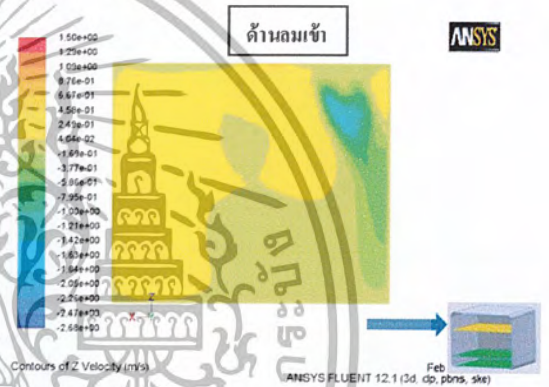
3.5 ผลการจำลองการไหลของอากาศในชั้น

อื่นๆ

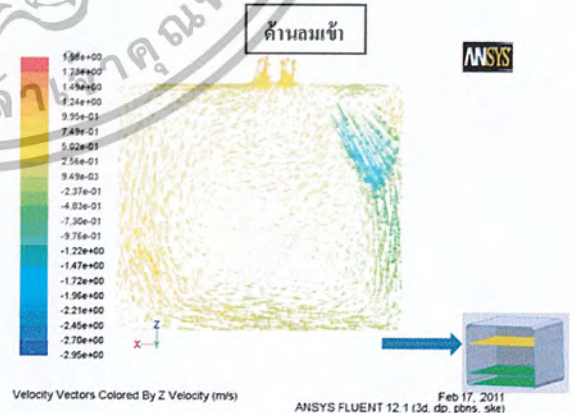
จากรูปที่ 12 ถึง 15 แสดงผลการจำลอง
ความเร็วของอากาศ และทิศทางของความเร็ว ซึ่งมีความ
สูงจากพื้นล่างของเตาอบ 80 มม. และ 260 มม.
ตามลำดับ



รูปที่ 12 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่าง
ของเตาอบ 80 มม. ในแกน z



รูปที่ 14 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่าง
ของเตาอบ 260 มม. ในแกน z

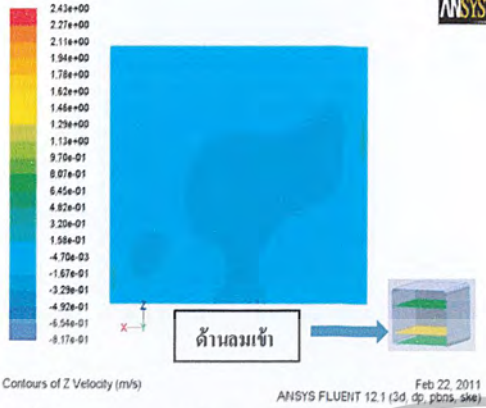


รูปที่ 15 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่าง
ของเตาอบ 260 มม. ในแกน z

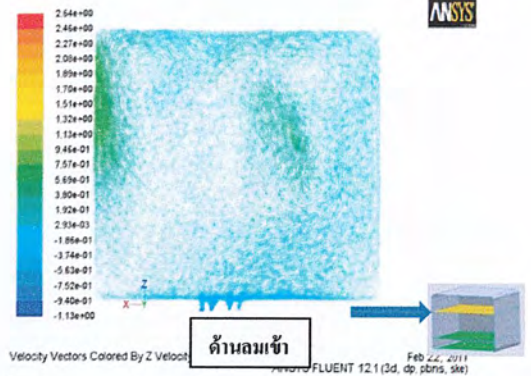
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ผลการปรับปรุงการไหลของอากาศ

3.6.1 ปรับปรุงรูปแบบที่ 1

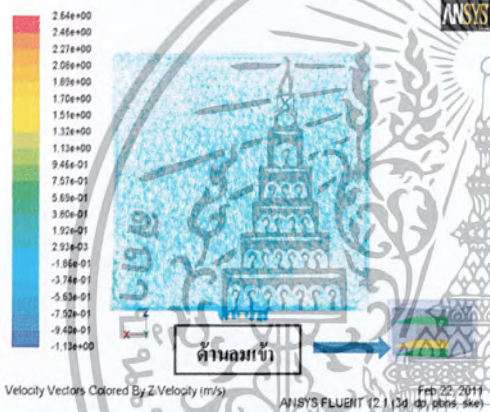


รูปที่ 16 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่างของเดอบ 80 มม. ในแกน z ปรับปรุงรูปแบบที่ 1

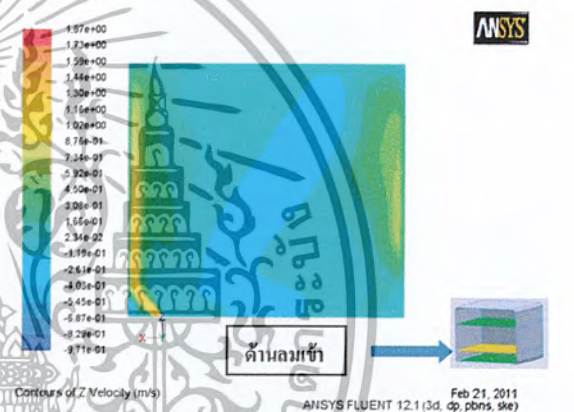


รูปที่ 19 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่างของเดอบ 260 มม. ในแกน z ปรับปรุงรูปแบบที่ 1

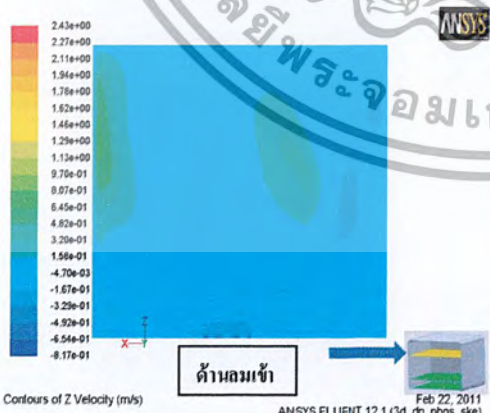
3.6.2 ปรับปรุงรูปแบบที่ 2



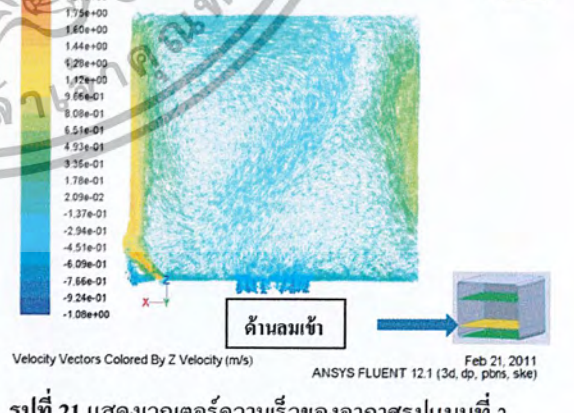
รูปที่ 17 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่างของเดอบ 80 มม. ในแกน z ปรับปรุงรูปแบบที่ 1



รูปที่ 20 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

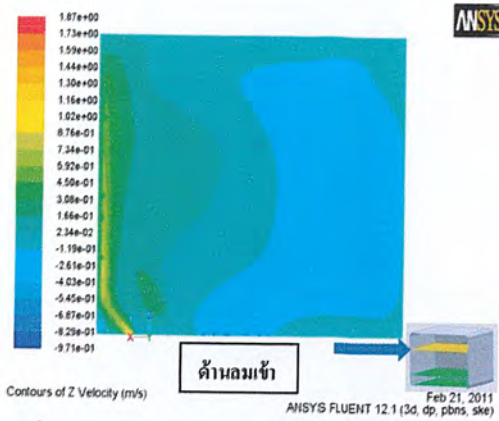


รูปที่ 18 แสดงคอนทัวร์ของความเร็วโดยสูงจากพื้นล่างของเดอบ 260 มม. ในแกน z ปรับปรุงรูปแบบที่ 1

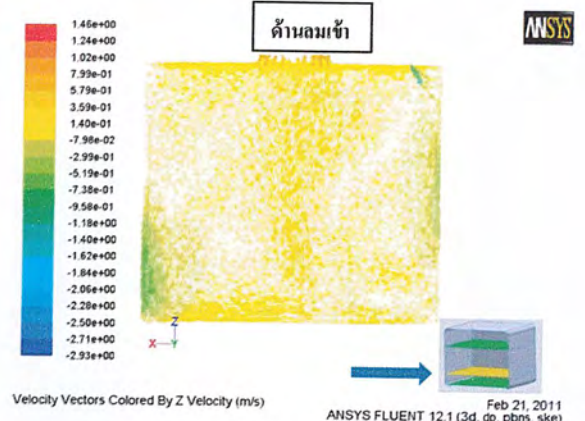


รูปที่ 21 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเดอบ 80 มิลลิเมตร

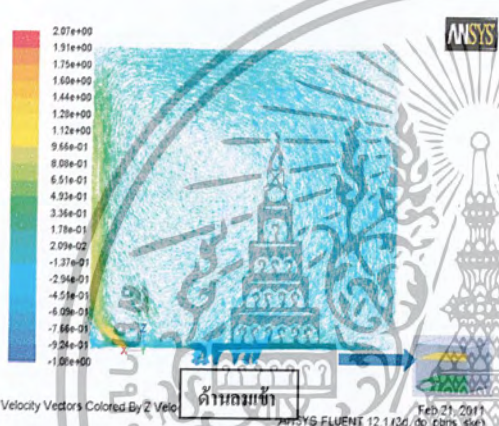
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



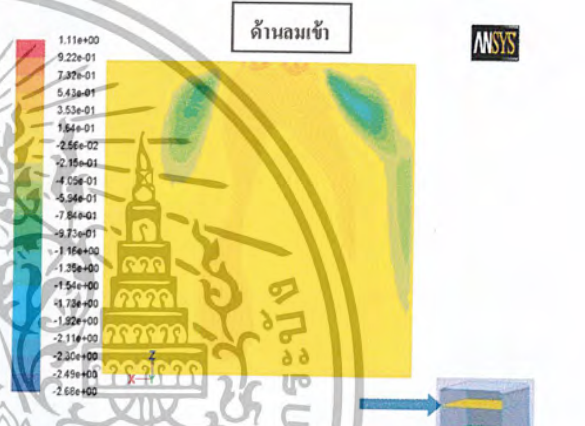
รูปที่ 22 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร



รูปที่ 25 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร

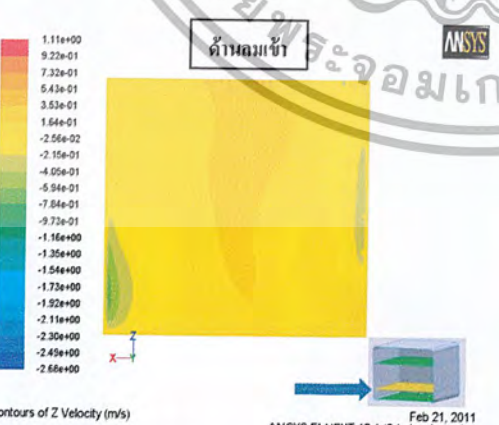


รูปที่ 23 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 2 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

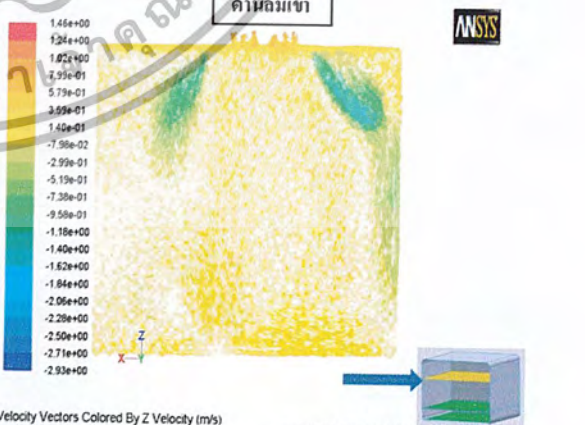


รูปที่ 26 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

3.6.3 ปรับปรุงรูปแบบที่ 3



รูปที่ 24 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 27 แสดงคอนทัวร์ความเร็วของอากาศรูปแบบที่ 3 ที่ความสูงจากพื้นล่างเตาอบ 260 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่าความเร็วมวลและทิศทางของความเร็วลมของเตาอบไฟฟ้าที่บริเวณพื้นล่างของเตาอบ จำนวน 25 จุด ที่ระนาบด้านล่างของเตาอบ พบว่าความเร็วที่ได้จากการทดลองโดยการวัดค่าจากเครื่องมือวัดความเร็วมวลและผลการจำลองการไหลของอากาศด้วยโปรแกรมมีค่าที่ใกล้เคียงกันและทิศทางการไหลของอากาศจากการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นมาเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันจึงเชื่อได้ว่าผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมสามารถเชื่อถือได้

ต่อจากนั้นจำลองรูปแบบการไหลของอากาศที่มีการปรับปรุงหน้ากาทงเข้าของอากาศใหม่ในรูปแบบต่างๆ จำนวน 3 รูปแบบ ผลที่ได้จากการจำลองพบว่าการกระจายตัวของอากาศในการจำลองของรูปแบบดั้งเดิมยังให้ผลที่น่าพอใจที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ทำการปรับปรุงทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งมีการกระจายตัวได้ทั่วบริเวณช่องอบของเตาอบไฟฟ้าได้ทั่วถึงกว่า โดยดูจากรูปที่ได้จำลองในระนาบต่าง ๆ

5.วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าผลที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยสามารถนำไปใช้งานต่อได้และผลที่ได้จากการจำลองบางส่วนยังไม่มีคามแม่นยำเท่าที่ควร ดังนั้นเนื่องจากปัญหาทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดไม่ที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อพิจารณาเทียบกับขนาดของแบบที่ทำการจำลอง เพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าของความเร็วลมอาจจะมีการบงทิศทางการไหลภายในเตาอบอยู่บ้างบางส่วน และอีกปัญหาคือเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความเร็วมวลมีความสามารถในการวัดค่าที่ความเร็วมวลต่ำไม่ค่อยดีนัก และในการจำลองการไหลควรที่จะสร้างแบบจำลองในส่วนที่ตัดลมเข้าไปด้วยเพื่อที่จะได้ผลจากการจำลองที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

1. Verboven, P., et al., *Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven*. Journal of Food Engineering, 2000.43(2): p. 61-73.
2. Mistry, H., et al., *Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens*. Applied Thermal Engineering, 2006.26(17-18): p. 2448-2456.
3. Curcio, S., et al., *Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation*. Journal of Food Engineering, 2008.87(4): p. 541-553.
4. Smolka, J., A.J. Nowak, and D. Rybarz, *Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations*. Journal of Food Engineering.97(3): p. 373-383.
5. สอดมน, จ.พ., การถ่ายเทความร้อน, ธ. สุทรชัยนาคแสง. 2547, กรุงเทพมหานคร: ท็อป/แมคโคร-ฮิล.
6. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide.2009: PathScale Corporation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้