

การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์
และห้องทดลองสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

AIR FLOW DESIGN FOR STORAGE RING AND EXPERIMENTAL HALL BUILDING SYNCHROTRON LIGHT RESEARCH INSTITUTE (PUBLIC ORGANIZATION)



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2015

การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์
และห้องทดลองสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



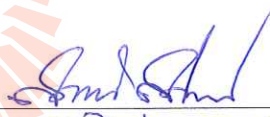
(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ทีรติ สุลักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ.น.ท. ดร.สราวุธ สุจิตจร)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกริกฤทธิ์ ลิทธิศาสตร์ : การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บ
อิเล็กตรอนและห้องโถงทดลองสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
(AIR FLOW DESIGN FOR STORAGE RING AND EXPERIMENTAL HALL
BUILDING SYNCHROTRON LIGHT RESEARCH INSTITUTE (PUBLIC
ORGANIZATION)) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณะ, 135 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลอง เพื่อออกแบบการไหลเวียนอากาศภายในอาคารใหม่ การศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองเสมือนระบบปรับอากาศของอาคาร ใช้ระเบียบวิธีคำนวณทางซีเอฟดี ที่มีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน 3 แบบ นำผลจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการวัด พบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน SST $k-\omega$ ให้ผลการจำลองความเร็วของอากาศสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ และแบบราบเรียบ ส่วนเมื่อดูที่อุณหภูมิพบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\epsilon$ ให้ผลการจำลองสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบอื่น

ทำการจำลองซีเอฟดีการไหลของอากาศภายในอาคารเทียบกับผลการวัด ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่าที่ความเร็วต่ำ 0.1 - 0.3 เมตร/วินาที มีความแตกต่างของข้อมูลบ้างเล็กน้อย แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าการตรวจวัดมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนการเปรียบเทียบอุณหภูมิ พบว่าค่าการวัดแตกต่างจากผลจำลองประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เป็นไปได้จากการลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงโดยตัดส่วนที่เป็นตู้จ่ายกำลังไฟฟ้าและตู้ความควบคุมออก ทำให้อุณหภูมิจากการตรวจวัดสูงกว่า แต่แนวโน้มและการกระจายอุณหภูมิมีความสอดคล้องกัน ได้ทำการออกแบบแนวทางการปรับปรุงการไหลเวียนอากาศใหม่ พบว่า วิธีปรับช่องจ่ายอากาศของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร ให้ผลการกระจายความเร็วและอุณหภูมิได้ดีกว่าและงบประมาณที่ใช้ในการจัดทำต่ำกว่า

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

KRERKRIT SITTISARD : AIR FLOW DESIGN FOR STORAGE RING
AND EXPERIMENTAL HALL BUILDING SYNCHROTRON LIGHT
RESEARCH INSTITUTE (PUBLIC ORGANIZATION). THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA, Ph.D., 135 PP.

SYNCHROTRON LIGHT/STORAGE RING/ AIR FLOW/CFD

This research presents the behavior of air circulation in the electron-storage ring and the experimental hall building to design new airflow circulation. The study simulates the air conditioning system of the building by using CFD technique. Three flow models are investigated: SST k- ω turbulent model, standard k- ϵ turbulent model, and the laminar flow. Simulation results were compared with the measurement. It was found that the SST k- ω turbulent model gave more satisfactorily of velocity distribution than other flow models. Considering the temperature distribution, the k- ϵ turbulent model gave more satisfactorily with the measurement than the rest considered models.

The simulation results of indoor air flow compared to the measured results at various locations were found to be slightly different at 0.1 to 0.3 m/s. However, at higher speeds of the airflow obtained values of the model and the measurement are closer together and tend to be in the same direction. For the temperature comparison, it was found that the measurement was different from the simulation result about 2-3°C due to a reduced complexity (no power supply and controller cabinet) of the simulation model. The trends and temperature distribution were consistent. In this research, two methods for improving the air circulation system are proposed. 1.)

installing the air outlet channels symmetrically and 2,) built a roof covering above storage ring zone. Simulation results shown that, symmetrical air outlet design give a good than the use of cover roof. It can improved the air distribution with a more uniform temperature and can save the installing cost than the roof method.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จล่วงด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นมิได้ ถ้าหากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สุลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ความช่วยเหลือสนับสนุน มอบทุนการศึกษา ให้คำปรึกษา และชี้แนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนคอยกระตุ้นให้กำลังใจจนงานบรรลุจุดประสงค์ ผู้วิจัยขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงในความเมตตาของท่าน

ขอขอบคุณผู้อำนวยการ ศ.น.ท.ดร.สราวุฒิ สุขจิตรจรร หัวหน้าส่วนงานพัฒนาระบบเชิงกล นายเมธี ไสภณ พี่ๆส่วนงานทรัพยากรมนุษย์ และเพื่อนร่วมงาน ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่อนุญาตและให้การสนับสนุนเพื่อการศึกษาในระดับปริญญาโทนี้

ขอขอบคุณคุณพวงศัวัฒน์ วิชัยเมือง และคุณปริษา วานวงศ์ น้องนักศึกษาระดับปริญญาตรีที่ร่วมทำงานวิจัย สร้างแบบจำลองและเก็บข้อมูลเพื่อใช้เปรียบวัดกับผลจำลอง ตลอดจนเก็บข้อมูลภายในอาคาร โรงทดลองกันจนดึกดื่น

ขอขอบคุณคุณอุษณกรณัพรพรณ ศรีอัครวิทยา คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการ ตลอดจนคำแนะนำและให้คำปรึกษาในเรื่องของระเบียบข้อบังคับต่างๆ ในการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณน้องๆบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยกลศาสตร์เชิงคำนวณ น้องพล น้องอู๋ม น้องเจด น้องกวาง น้องเอก น้องหนึ่ง น้องท้าว และทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือการทำวิจัยด้วยดีเสมอ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อบวรณะวิทย์ – คุณแม่เอมอร สติธิศาสตร์ คุณพีธิดารัตน์ ปัญญาพิณิต พร้อมภรรยาคุณสุกัญญาและลูกสาว ด.ญ.กวิสรา ผู้คอยดูแล เป็นที่ปรึกษาและให้กำลังใจ ตลอดจนผลักดันให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นในการศึกษา จนสามารถสำเร็จการศึกษา

เกริกฤทธิ์ สติธิศาสตร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชินโครตรอน.....	5
2.1.1 การผลิตแสงซินโครตรอน.....	5
2.1.2 ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน.....	9
2.2 ระบบปรับอากาศของอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนและโถงทดลอง.....	10
2.3 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	11
2.3.1 กระบวนการซีเอฟดี.....	12
2.3.2 ขั้นตอนของซีเอฟดี.....	13
2.4 สมการควบคุมการไหล.....	13
2.4.1 การไหลแบบปั่นป่วน.....	13
2.4.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.6.1 การใช้กรรมวิธีทางตัวเลขจำลองระบบปรับอากาศวงแหวน- กักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	19
2.6.2 การเลือกใช้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนในแบบจำลอง	24
3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 สถานที่การศึกษาวิจัย	26
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	26
3.2.1 สร้างแบบจำลอง	26
3.2.2 เก็บข้อมูล	27
3.2.3 การสร้างกริด	28
3.2.4 การจำลองผลด้วยโปรแกรม Ansys Fluent V14	29
3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	31
3.2.6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	31
3.3 การตรวจสอบความถูกต้อง	31
4 แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	32
4.1 แบบจำลอง(Experimental Study)	32
4.2 การจำลอง CFD(CFD SIMULATION)	35
4.3 ผลการจำลองและการวิเคราะห์	38
4.4 สรุปการเปรียบเทียบผล	42
5 พฤติกรรมการไหลของอากาศในสถานะปัจจุบัน	43
5.1 อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	43
5.1.1 ระบบปรับอากาศภายในอาคาร	44
5.1.2 ค่าการออกแบบระบบปรับอากาศภายในอาคาร	44
5.2 การตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วอากาศ	50
5.3 การจำลองการไหลอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลผลตรวจวัด	60
6 แบบจำลองการปรับปรุงการไหลของอากาศและข้อเสนอแนะ	73
6.1 ปรับช่องจ่ายอากาศของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร	73
6.2 ติดตั้งหลังคาให้กับส่วนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	76
6.3 ประเมินราคางานก่อสร้าง	79
6.4 สรุปและข้อเสนอแนะ	79
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	80
7.1 แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	80
7.2 พฤติกรรมการไหลของอากาศในสภาวะปัจจุบัน	80
7.3 แบบจำลองการปรับปรุงการไหลของอากาศและข้อเสนอแนะ	81
รายการอ้างอิง	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศของแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	86
ภาคผนวก ข ข้อมูลการตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร-วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	87
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	118
ประวัติผู้เขียน	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่วัดจากอุปกรณ์ระบบปรับอากาศ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 52
5.2	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ตรวจวัดบริเวณพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ 54



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....	1
1.2 (บน) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (กลาง) อุณหภูมิบนอุปกรณ์วงกักเก็บอิเล็กตรอน ที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัด และ (ล่าง) ความไม่เสถียรของลำแสง.....	2
2.1 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เป็นแหล่งกำเนิดที่ให้แสงมีค่าความยาวคลื่นกว้าง ตั้งแต่ช่วงอินฟราเรดถึงรังสีเอกซ์.....	5
2.2 ปืนอิเล็กตรอน ใช้สำหรับผลิตลำอนุภาคอิเล็กตรอน.....	6
2.3 โครงสร้างเครื่องเร่งอนุภาคทางตรง.....	7
2.4 เครื่องเร่งอนุภาคทางตรง(LINAC) และบูสเตอร์ซินโครตรอน(SYN)	8
2.5 การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กบังคับเลี้ยว	8
2.6 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างวัสดุโดยใช้แสงซินโครตรอน.....	9
2.7 แผนผังสถานีทดลองต่างๆ ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน.....	10
2.8 ตำแหน่งติดตั้งAHU และ FCU ของระบบปรับอากาศอากาศของอาคารวงแหวน- กักเก็บอิเล็กตรอนและโรงทดลอง.....	11
2.9 ลักษณะความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน.....	14
2.10 แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	18
2.11 ผลจำลองการไหลของอากาศสำหรับ (บน)CASE A และ (ล่าง)CASE B.....	20
2.12(ก) เวกเตอร์ความเร็วของ1/24 ส่วนของอุโมงค์วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน.....	21
2.12(ข) คอนทัวร์อุณหภูมิของ1/24 ส่วนของอุโมงค์วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน.....	22
2.13 เวกเตอร์ความเร็ว(บน) และคอนทัวร์อุณหภูมิ(ล่าง) ของ1/12 ส่วนของโรงทดลอง.....	24
2.14(ก) กราฟความเร็ว ณ ความสูงต่างๆ ที่หน้าตัดตัดผ่านช่องลมกลับที่ความเร็ว 2 เมตร/วินาที.....	25
2.14(ข) กราฟความเร็ว ณ ความสูงต่างๆ ที่หน้าตัดตัดผ่านช่องลมกลับที่ความเร็ว 3 เมตร/วินาที.....	25
3.1 แบบ 3 มิติที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม SolidWorks2013.....	27
3.2 ตำแหน่งตรวจวัดความเร็วลมและอุณหภูมิที่ระดับความสูง 1.2 เมตร.....	28
3.3 กริดแบบ Tetrahedral ใช้ในการจำลองผล.....	28
3.4 คอนทัวร์ความเร็วที่ระดับกึ่งกลางหน้าตัดช่องจ่ายอากาศของ FCU.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.5	การปรับช่องจ่ายอากาศของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร ก่อนปรับปรุง(ซ้าย) หลังปรับปรุง(ขวา)	30
3.6	แบบจำลองติดตั้งหลังคาให้กับส่วนวงแหวนกักแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	30
3.7	แนวแกนตรวจวัดซึ่งตัดผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางของอาคาร	31
4.1	แบบจำลองเสมือน	33
4.2	ระนาบกึ่งกลางและระดับความสูงที่ทำการตรวจวัด	34
4.3	การตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิ	34
4.4	เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ใน CFD	35
4.5	กราฟเปรียบเทียบความเป็นอิสระของกริดแสดงความเร็ว- ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระนาบความสูง 60 มิลลิเมตร	36
4.6	กริดแบบ Tetrahedral ความละเอียด 641,093(บน) ที่ใช้ในการจำลองผล และ(ล่าง)ตัดระนาบกึ่งกลางที่ทำการเปรียบเทียบกับผลการวัด	37
4.7	กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศบนเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 60 มม.	38
4.8	กราฟเปรียบเทียบความเร็วบนเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 130 มม.	39
4.9	กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศบนเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 355 มม.	37
4.10	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 60 มม.	40
4.11	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 130 มม.	41
4.12	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตามเส้นกึ่งกลางระนาบความสูง 355 มม.	44
5.1	อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และ โถงทดลอง	44
5.2	ACLS ที่วางตัวอยู่โดยรอบของตัวอาคาร	45
5.3	AHU ทำหน้าที่ปรับอากาศบริเวณภายในพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	45
5.4	FCUC และ AHUC ทำหน้าที่ปรับอากาศบริเวณส่วนต่อขยาย	45
5.5	ช่องทางออกอากาศภายในอาคาร	45
5.6	แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์	47
5.7	แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่โถงทดลอง	48
5.8	แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่ส่วนต่อขยายโถงทดลอง	49
5.9	แสดงตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ ACLS	50

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

5.10	ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ AHU	51
5.11	ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ FCU-C และ AHU-C	51
5.12	ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศภายในอาคาร	53
5.13	เครื่องมือวัดแบบลวดความร้อน	55
5.14	กริด Tetrahedral ของแบบจำลอง	56
5.15	คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 6 เมตรจากพื้นอาคาร	57
5.16	เส้นความเร็วการไหลของอากาศจากช่องออกอากาศของ FCU	57
5.17	เส้นความเร็วการไหลของอากาศจากช่องออกอากาศของ AHU	58
5.18	คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 3.6 เมตรจากพื้นอาคาร	59
5.19	คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร	60
5.20	คอนทัวร์อุณหภูมิที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร	60
5.21	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน x-x'	61
5.22	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน x-x'	61
5.23	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R1-R11	62
5.24	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R1-R11	62
5.25	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R2-R12	63
5.26	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R2-R12	63
5.27	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R3-R13	64
5.28	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R3-R13	64
5.29	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R4-R14	64
5.30	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R4-R14	65
5.31	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R5-R15	65
5.32	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R5-R15	66
5.33	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน Z-Z'	66
5.34	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน Z-Z'	67
5.35	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R6-R16	67
5.36	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R6-R16	68

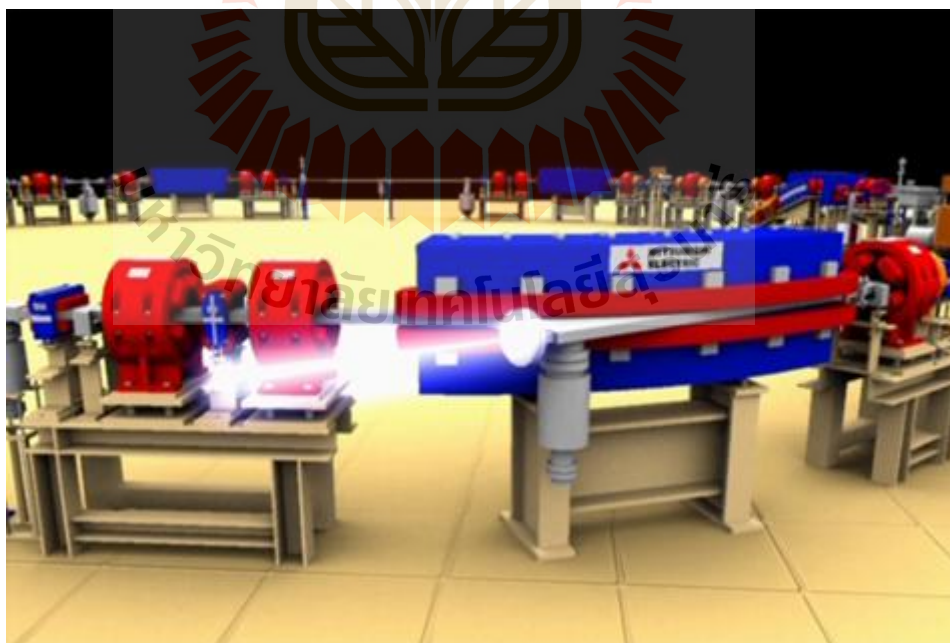
สารบัญรูป (ต่อ)

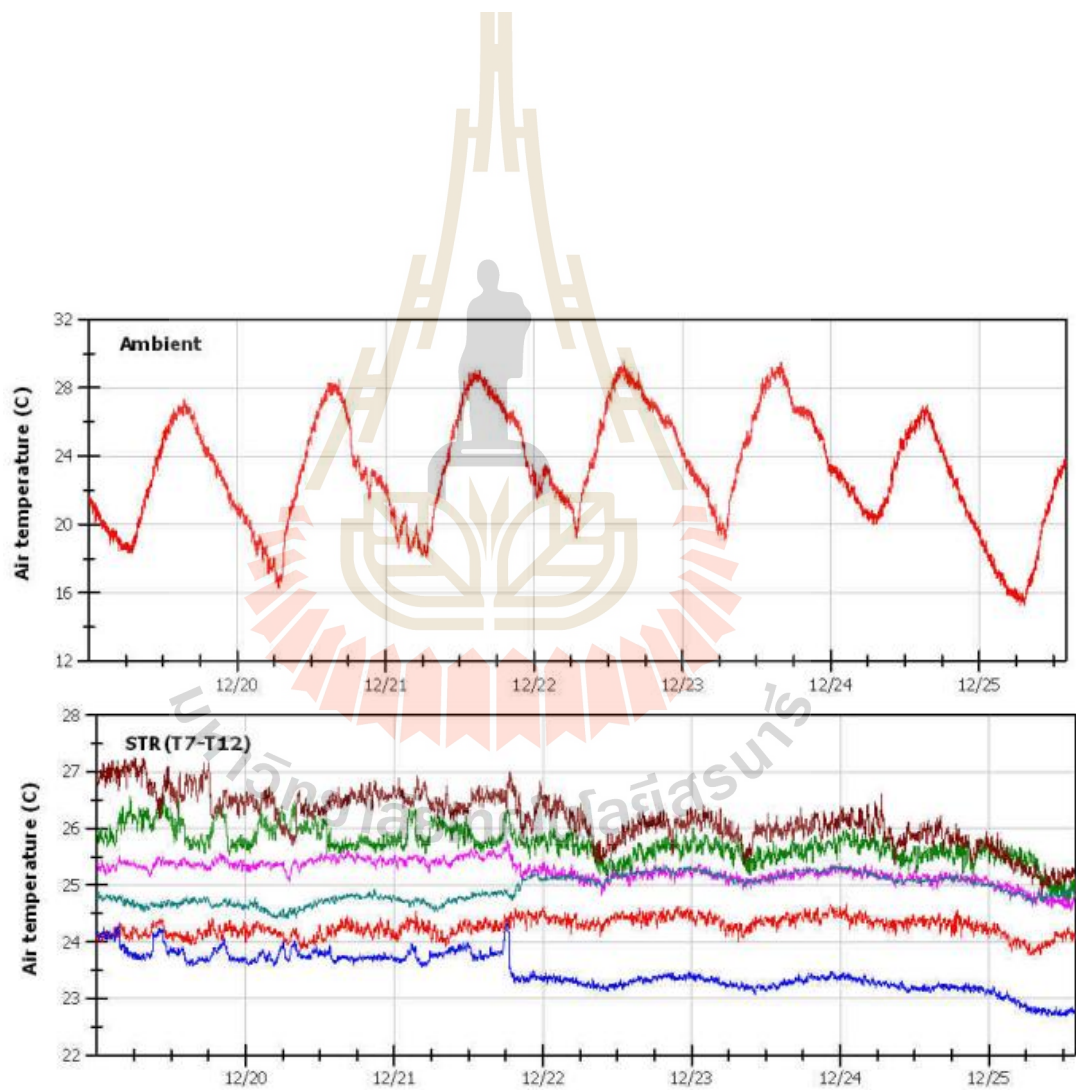
หน้า

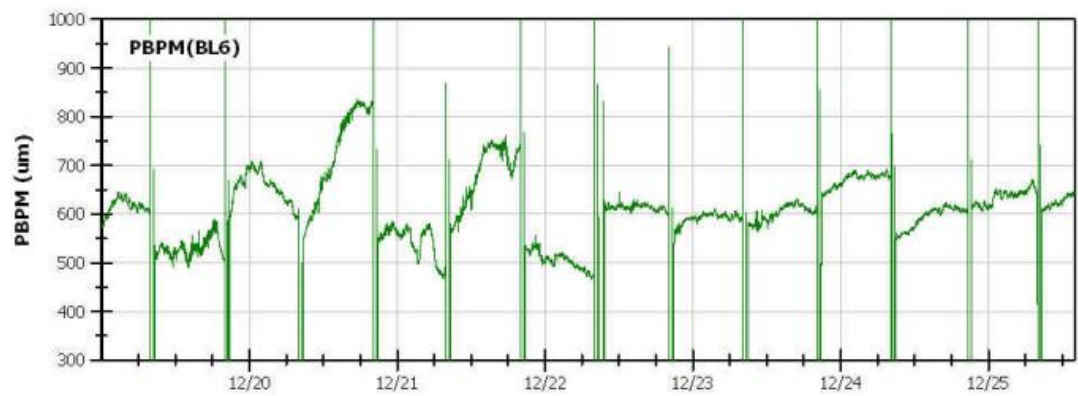
5.37	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R7-R17	68
5.38	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R7-R17	69
5.39	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R8-R18	69
5.40	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R8-R18	70
5.41	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R9-R19	70
5.42	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R9-R19	71
5.43	เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R10-R20	71
5.44	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R10-R20	72
6.1	(บน)แผนผังจัดเรียงช่องลมจ่ายของ AHU ใหม่ และ(ล่าง)รูป3มิติแบบจำลองคอมพิวเตอร์	74
6.2	(บน)คอนทัวร์ความเร็ว และ(ล่าง)เส้นความเร็วการไหล บนระนาบความสูง 3.6 เมตรที่ตัดผ่านช่องลมจ่ายที่จัดวางใหม่	75
6.3	คอนทัวร์ความเร็วบนระนาบความสูง 1.2 เมตร	75
6.4	คอนทัวร์อุณหภูมิบนระนาบความสูง 1.2 เมตร	76
6.5	โมเดล 3มิติ ของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ติดตั้งหลังคาปิด	76
6.6	คอนทัวร์ความเร็วบนระนาบความสูง 3.6 เมตร เมตร (มีหลังคาปิด)	77
6.7	เส้นความเร็วบนระนาบความสูง 3.6 เมตร (มีหลังคาปิด)	77
6.8	ความเร็วบนระนาบความสูง 1.2 เมตร เมตร (มีหลังคาปิด)	76
6.9	อุณหภูมิบนระนาบความสูง 1.2 เมตร เมตร (มีหลังคาปิด)	78
7.1	(ซ้าย)แบบจำลองปรับช่องลมจ่ายใหม่ และ(ขวา)แบบจำลองติดตั้งหลังคาปิด	82

คำอธิบายสัญลักษณ์

ρ	=	ความหนาแน่น(W/m·s)
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะ(kJ/kg·K)
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ(W/m·K)
t	=	เวลา(s)
g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก(m/s ²)
p	=	ความดัน(N/m ²)
T	=	อุณหภูมิ(°C)
q	=	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน(W/m ²)
u	=	ความเร็ว(m/s)
μ	=	ความหนืด(kg/m·s)
μ_t	=	ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน(kg/m·s)
u, v, w	=	ความเร็วในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ(m/s)
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	=	ความเร็วเฉลี่ยในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ(m/s)
u', v', w'	=	ความเร็วแปรปรวนในทิศแกน x, y, z ตามลำดับ(m/s)
$p, \bar{p}, p'$	=	แรงดัน แรงดันเฉลี่ย และแรงดันแปรปรวน ตามลำดับ(N/m ²)
δt	=	ช่วงเวลาในการเฉลี่ย(s)
k	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(kJ/kg)
ε	=	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(kJ/kg.s)
$C_{1\varepsilon}$	=	ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของสมการอัตราสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
	=	มีค่าเท่ากับ 1.44
$C_{2\varepsilon}$	=	ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของสมการอัตราสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
	=	มีค่าเท่ากับ 1.92
C_μ	=	ค่าคงที่ของ μ_t มีค่าเท่ากับ 0.09







1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศ ภายในอาคารรวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซีเอฟดี (CFD) เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของอากาศ ผลจากการศึกษานำไปสู่แนวทางการปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศที่สามารถรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและสม่ำเสมอได้

1.3.1 สร้างแบบจำลองอาคารเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนโดยคอมพิวเตอร์

1.3.2 ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมกระจายตัวของอากาศโดยโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหล

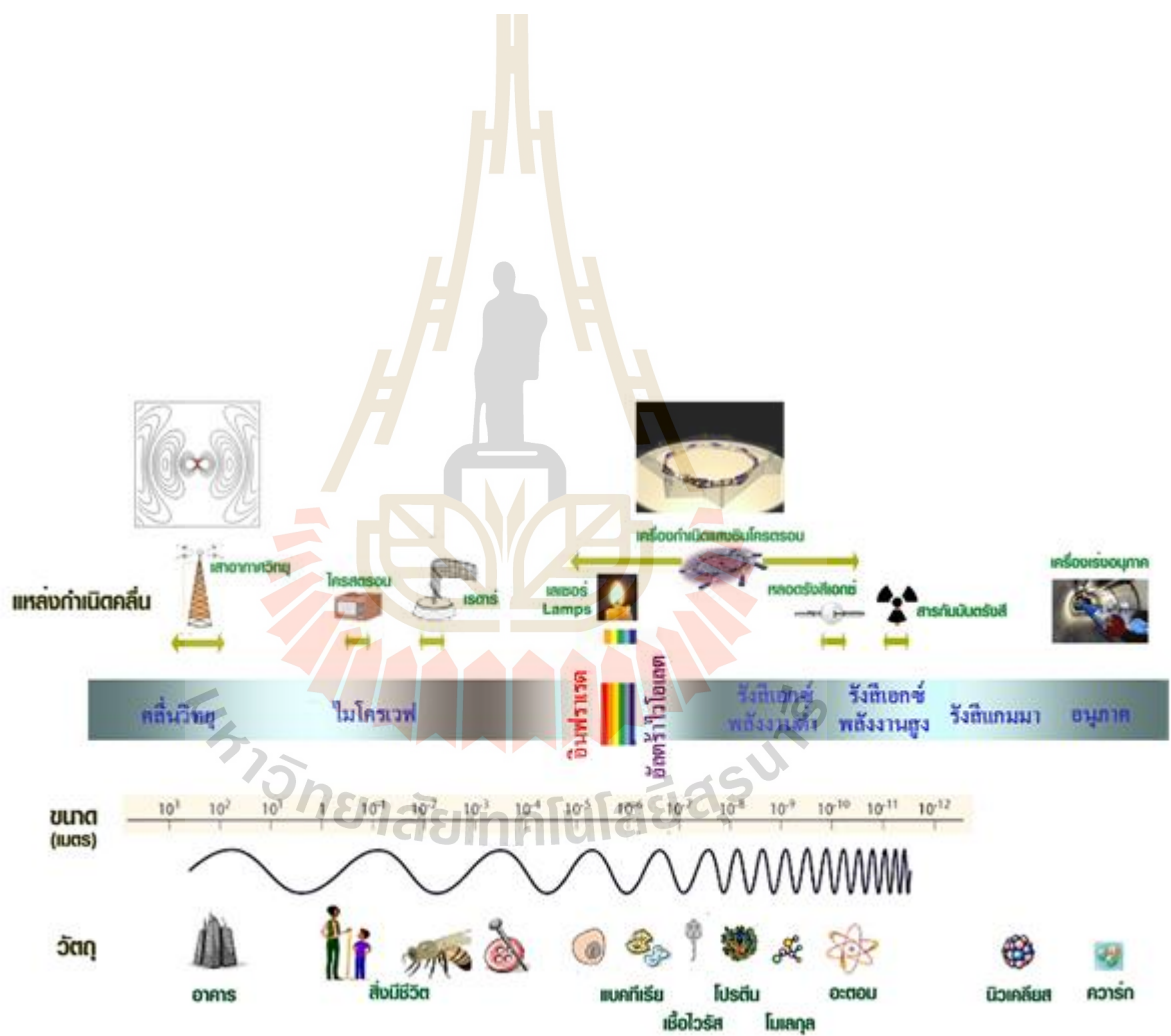
1.3.3 เปรียบเทียบผลจากการจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง

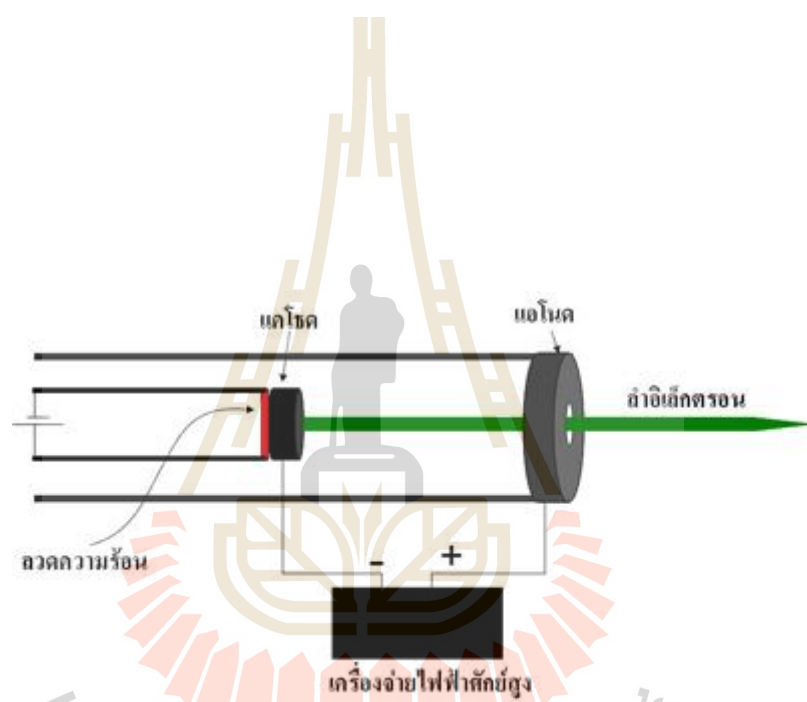
1.3.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่างๆของระบบปรับอากาศและหาแนวทางปรับปรุง

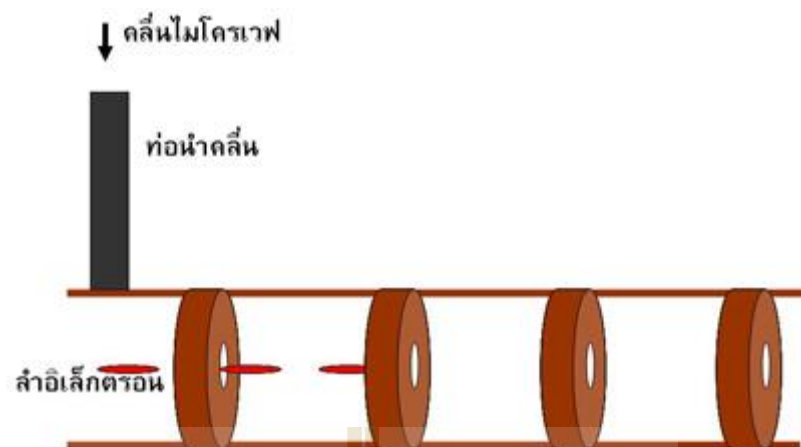
1.3.5 เสนอแนวทางปรับปรุงระบบปรับอากาศให้สามารถรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ

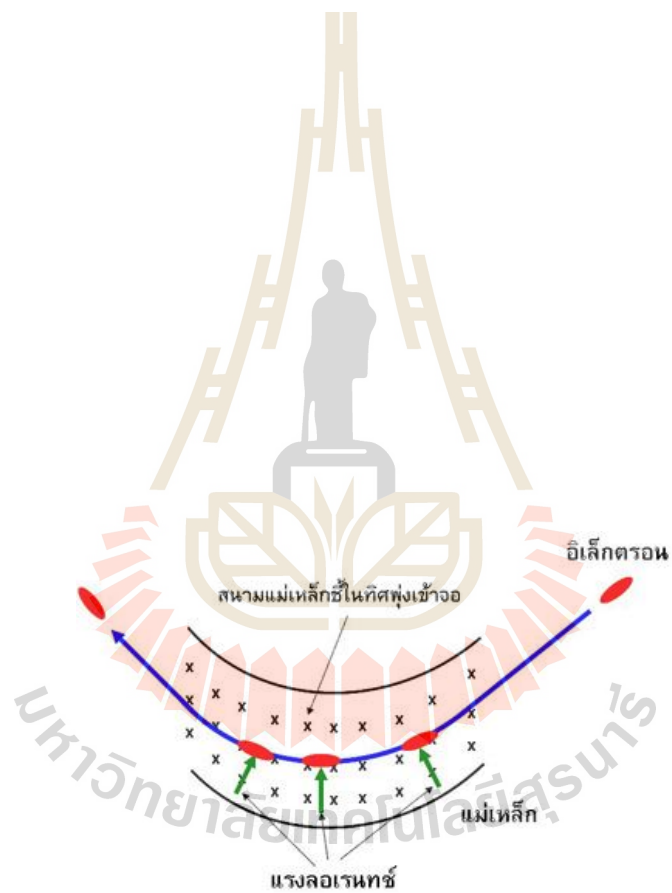
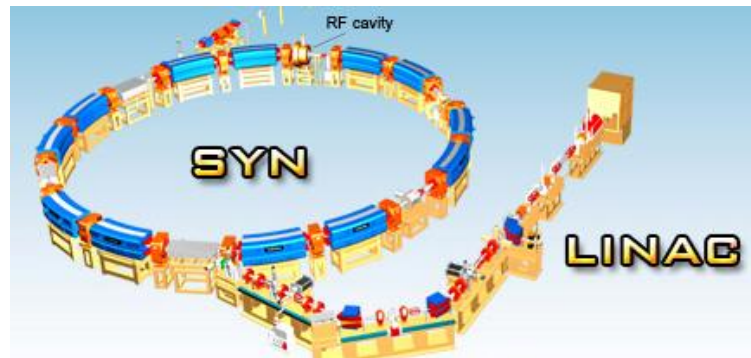
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถรักษาอุณหภูมิระบบปรับอากาศภายในอาคารรวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ และห้องโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนให้เหมาะสมและสม่ำเสมอได้ ซึ่งจะส่งผลให้ลำอิเล็กตรอนมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นยังจะเป็นประโยชน์ต่อนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยที่มาใช้แสงซินโครตรอนต่อไป





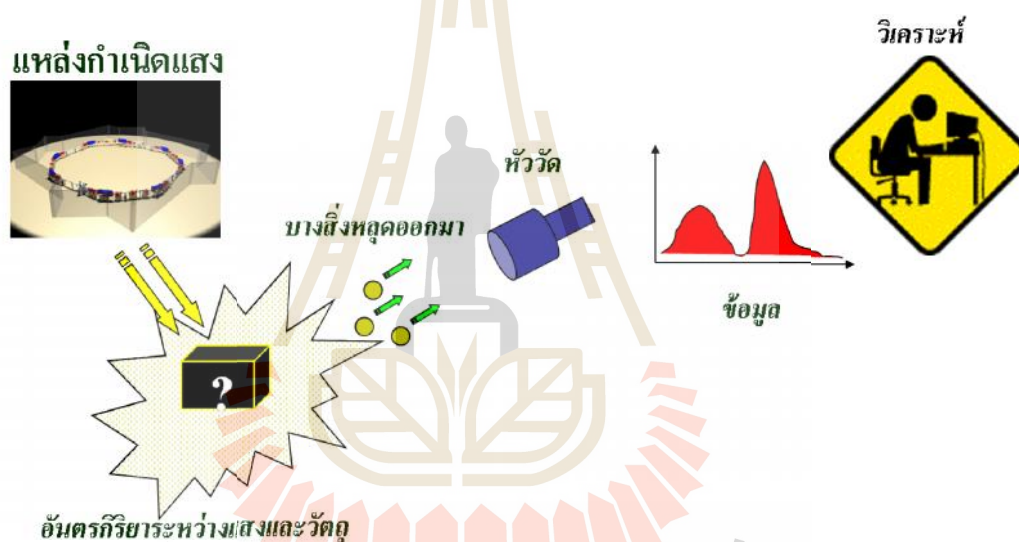




2.1.2 ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอนถูกใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิจัยหลากหลายสาขาโดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาองค์ประกอบและ โครงสร้างของวัสดุต่างๆ

การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างวัสดุอาศัยหลักการใช้แสงซินโครตรอนเข้าไปกระตุ้นอะตอมที่อยู่ภายในวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการบางอย่าง เช่น แสงเกิดการกระเจิงจากวัสดุ หรือวัสดุมีการดูดกลืนแสง หรือมีบางสิ่งหลุดออกมาจากวัสดุ เช่น มีอิเล็กตรอนหลุดออกมา หรือวัสดุมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ จากนั้นจะมีระบบวัดสำหรับวัดแสงที่กระเจิง หรือวัดการดูดกลืนแสง หรือวัดอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมา แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกมาเป็นองค์ประกอบ หรือลักษณะโครงสร้างวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



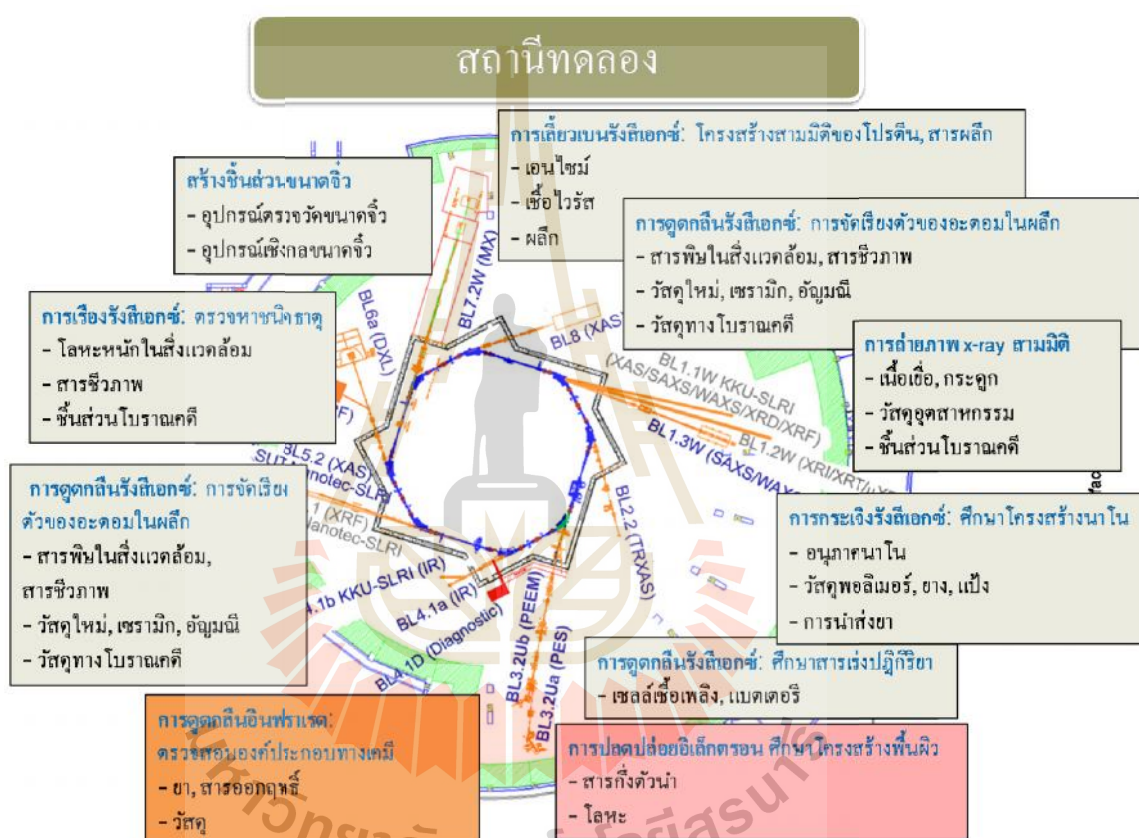
รูปที่ 2.6 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างวัสดุโดยใช้แสงซินโครตรอน (ที่มา:

www.slri.or.th)

สิ่งที่ทำการวัดหลังจากการกระตุ้นด้วยแสงซินโครตรอน จะให้ข้อมูลที่แตกต่างกันไป เช่น หากวัดรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุ จะได้ข้อมูลของขนาดและรูปร่างของโมเลกุล หรือขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน หรือหากวัดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากวัสดุ จะได้ข้อมูลลักษณะพื้นผิวของโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำ หากวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของวัสดุ จะได้ข้อมูลระยะห่างระหว่างอะตอมภายในวัสดุ หากวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของวัสดุ จะได้ข้อมูลชนิดพันธะเคมีในวัสดุ หรือหากวัดรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาจากวัสดุ จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ

ของวัสดุนั้น เป็นต้น นอกจากนั้น แสงซินโครตรอนยังสามารถใช้ในการสร้างเป้าหมายขนาดเล็ก ระดับไมครอน เพื่อสร้างชิ้นส่วนขนาดเล็ก

ภายในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนจึงมีสถานียทดลองต่างๆ อยู่รอบๆ วงกักเก็บ อิเล็กตรอน โดยสถานียทดลองเหล่านี้จะมีชื่อเรียกตามสิ่งที่ทำการวัด เช่น สถานีทดลองการกระเจิงรังสีเอกซ์ สถานีทดลองการดูดกลืนรังสีเอกซ์ สถานีทดลองการเรืองรังสีเอกซ์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังสถานียทดลองต่างๆ ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (ที่มา: www.slri.or.th)

2.2 ระบบปรับอากาศของอาคารวางแผนกักเก็บอิเล็กตรอนและห้องทดลอง

ระบบปรับอากาศภายในอาคาร อันได้แก่ อาคารสำนักงาน โรงแรม โรงพยาบาล สถานศึกษา ถือว่ามีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด ในบางแห่งสัดส่วนการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศอาจสูงถึง 50% ของการใช้พลังงานทั้งหมดในอาคาร ดังนั้นการออกแบบอาคารที่ดี ไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงภูมิทัศน์ หรือเลือกวัสดุป้องกันความร้อนประเภทต่างๆ เข้ามาภายในอาคาร



ปั๊มและเครื่องอัดไอ การหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการทางด้านการเคมีการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านตึกและตัวอาคาร การกระจายมลภาวะในอากาศและน้ำ การไหลของน้ำในแม่น้ำ ลำธารและมหาสมุทร การทำนายสภาพอากาศ การไหลของเลือดในระบบหมุนเวียนของร่างกาย เป็นต้น(กิริติ สุกฤษณ์)

2.3.1 กระบวนการซีเอฟดี

การสร้างสมการเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการไหลทำได้ไม่ยากนัก สิ่งที่ยากคือการแก้สมการหาผลเฉลย แม้คอมพิวเตอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคำนวณได้ถูกนำมาช่วยแก้สมการการไหล แต่คอมพิวเตอร์ก็เข้าใจเพียงตรรกะแบบพีชคณิต(บวก ลบ คูณ หาร) ไม่เข้าใจตรรกะแบบอนุพันธ์คณิต ด้วยเหตุนี้ การแก้สมการควบคุมการไหลโดยคอมพิวเตอร์จึงต้องใช้เทคนิคพิเศษเข้าช่วย เพื่อแปลงสิ่งที่มนุษย์เข้าใจ(อนุพันธ์คณิต) ให้เป็นสิ่งที่คอมพิวเตอร์เข้าใจ(พีชคณิต) กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า ดิสครีไทเซชัน(Discretization)

กระบวนการดิสครีไทเซชันมีหลายวิธี แต่ที่นิยมนำมาประยุกต์แก้ปัญหาเชิงตัวเลขมี 3 วิธี คือ วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์(Finite Difference Method:FDM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method:FEM) และวิธีไฟไนต์โวลูม(Finite Volume Method:FVM) ซึ่งจะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่เหมาะสมและนิยมใช้สำหรับปัญหาการไหลคือวิธีไฟไนต์โวลูม

วิธีไฟไนต์โวลูม เป็นวิธีที่ใช้หลักการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อย จากนั้นอินทิเกรตสมการควบคุมบนปริมาตรควบคุม แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่างและคำนวณหาผลเฉลยที่จุดต่อต่างๆ โดยใช้วิธีคำนวณซ้ำ การอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมเป็นหลักการทำให้วิธีไฟไนต์โวลูมแตกต่างจากวิธีดิสครีไทเซชันแบบอื่น เป็นหลักพื้นฐานของความสัมพันธ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม จึงสอดคล้องกับกายภาพของการไหลเป็นอย่างดีทำความเข้าใจได้ง่าย ข้อดีของวิธีไฟไนต์โวลูมคือใช้ได้ผลดีกับการไหลทุกรูปแบบ ทั้งราบเรียบและปั่นป่วน จึงถูกนำไปใช้พัฒนาซอฟต์แวร์ทั่วไป

2.3.2 ขั้นตอนของซีเอฟดี

โปรแกรมซีเอฟดีที่พัฒนาขึ้นเองหรือซอฟต์แวร์ซีเอฟดีสำเร็จรูปมีการทำงานแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

การประมวลผลก่อน(Pre-processor) ประกอบด้วยการกำหนดข้อมูลให้กับโปรแกรม ได้แก่ สร้างรูปทรงของโดเมน ที่จะวิเคราะห์ สร้างกริดหรือปริมาตรควบคุมหรือเอลิเมนต์ การกำหนดค่าคุณสมบัติของการไหล เป็นต้น ความแม่นยำของผลเฉลยที่แก้ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง หนึ่งในปัจจัยหลักคือจำนวนจุดต่อใช้ โดยทั่วไปจำนวนจุดต่อมากย่อมได้ความ

ถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนจุดต่อน้อย แต่จำนวนจุดต่อมากย่อมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เวลาประมาณ 50% ของที่ใช้ทั้งหมดถูกใช้ไปกับการเตรียมของมูลกริดที่เหมาะสมให้กับปัญหา ดังนั้นการป้อนข้อมูลให้กับการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของจำนวนจุดต่อที่ใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องยอมรับได้ และใช้เวลาประมวลผลที่ไม่นานเกินไป

การประมวลผล(Processor) เป็นขั้นตอนการเลือกใช้รูปแบบดิสครีไทเซชันเพื่อสร้างสมการดิสครีไทส์ โดยปกติในซอฟต์แวร์ซีเอฟดีแต่ละแบบจะถูกพัฒนาบนกระบวนการดิสครีไทเซชันเพียงอันใดอันหนึ่ง ในขั้นตอนการประมวลผลนี้ ผู้พัฒนาหรือผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องเลือกแบบแผนการประมาณค่าเชิงตัวเลข(Numerical scheme) ที่เหมาะสมให้กับการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลคำนวณที่ได้มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพตามต้องการ

การประมวลผลหลัง(Post-processor) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการซีเอฟดี ขั้นตอนนี้รับค่าผลลัพธ์จากขั้นตอนการคำนวณมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟฟิกต่างๆ เช่น รูปร่างของปัญหาและกริด กราฟเวกเตอร์ กราฟคอนทัวร์ กราฟพื้นผิว การเปลี่ยนตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนตัว การหมุน เป็นต้น

2.4 สมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลล้วนถูกสร้างบนกฎมูลฐานของ 1.)ความอนุรักษ์มวล ที่ว่ามวลย่อมไม่เพิ่มขึ้นหรือสูญหายไปจากระบบ 2.)ความอนุรักษ์โมเมนตัม ที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมย่อมเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน และ 3.)ความอนุรักษ์พลังงาน ที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานย่อมเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำกับปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องจึงประกอบด้วย

สมการอนุรักษ์มวล

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

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla (\rho u)) = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (3.2)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla (Tu)) = k \nabla^2 T - p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} + q \quad (3.3)$$

2.4.1 การไหลแบบปั่นป่วน

ทาง

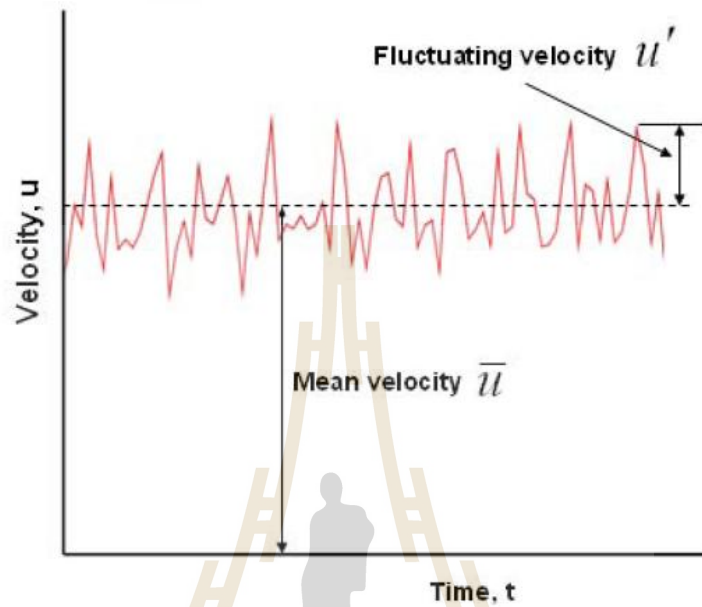
ขอ

u' ขั

ๆ จะ: |ติกรรมก

ค่าเจ $\bar{u}$ ไม่ขึ้นกั

u คัง งจจจจจจ



จัน)อ ในรูปของคั

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

$$w = \bar{w} + w'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

จากนั้นทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-average) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} u' dt &= 0 & ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} u dt = 0 \\ \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} v' dt &= 0 & ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} v dt = 0 \\ \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} w' dt &= 0 & ; & \quad \frac{1}{\delta t} \int_0^{\delta t} w dt = 0\end{aligned}\quad (3.5)$$

แทนสมการ 3.4 ลงในสมการเชิงอนุพันธ์มวล โดยพิจารณาเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

และทำการแทนสมการ 3.4 – 3.5 ลงในสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมโดยพิจารณาเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว ไม่ลึผลของค่าความหนืดและไม่ลึผลของแรงโน้มถ่วงจากน้ำหนักของตัวเอง จะได้

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'u'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'v'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \rho \overline{u'w'} \right]\end{aligned}\quad (3.7a)$$

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'u'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'v'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) - \rho \overline{v'w'} \right]\end{aligned}\quad (3.7b)$$

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'u'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'v'} \right] + \\ &\quad \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \rho \overline{w'w'} \right]\end{aligned}\quad (3.7c)$$

สมการ 3.7a – 3.7c เรียกว่า สมการเรย์โนลด์ สังกะยาจะเรียกว่าสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมของนาเวียร์-สโตกส์ โดยมีเทอมเพิ่มเข้ามา 9 เทอม ซึ่งเรียกว่า Reynolds Stresses tensor หรือ Turbulence Stresses tensor

$$\text{Turbulence Stresses tensor} = \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

จะเห็นว่าสมการเรย์โนลด์นั้น มีตัวแปรไม่ทราบค่าเป็นค่าเฉลี่ยของความดันและความเร็วในแกนต่างๆ ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปของการไหลไม่ปั่นป่วนทำให้สามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ แต่อย่างไรก็ตามทอม Reynolds Stresses นั้นเป็นตัวไม่ทราบค่าที่เพิ่มขึ้นมา จึงจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ

2.4.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

ในการสร้างแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ทฤษฎีดังนี้

1. Large eddy simulation(LES)

ทฤษฎีนี้จะจำลองพฤติกรรมของ *Eddy* ขนาดใหญ่และพิจารณาว่าพฤติกรรมของ *Eddy* ขนาดเล็กนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามปัญหา

2. Reynolds stresses method(RMS)

ทฤษฎีนี้จะทำการหาสมการเพิ่มเติมจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Reynolds stresses แต่ละตัวใน Reynolds Stresses tensor ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าทฤษฎี Eddy viscosity model (จะได้กล่าวในข้อถัดไป) และเกี่ยวข้องกับสมการจำนวนมาก นอกจากนั้นยังมีค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งมีจำนวนมากและไม่ชัดเจน อีกทั้งยังใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่าทฤษฎีอื่น จึงไม่ค่อยได้รับความนิยม

3. Eddy viscosity model(EVM)

ทฤษฎีนี้เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน ทฤษฎีนี้พิจารณาว่า *Reynolds stresses* นั้นสัมพันธ์กับความเร็วเฉลี่ยดังนี้

$$-\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} = \mu_t \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} & \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่ μ_t คือ ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อแทนความสัมพันธ์ของสมการ 3.9 ลงในสมการ 3.7a – 3.7c จะทำให้สมการเรย์โนลด์อยู่ในรูปแบบสมการดังนี้

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right] \quad (3.10a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right] \quad (3.10b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right] \quad (3.10c)$$

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจาก EVM (Eddy Viscosity Model) นี้มีหลากหลายตัวที่เป็นที่นิยมและถูกนำไปพัฒนาสร้างเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเพื่อการใช้งาน เช่น Zero Equation Turbulence Model, Standar $k - \varepsilon$ Model, Standard $k - \omega$ Turbulence Model, Shear Stress Transport Turbulence Model (SST) และอื่นๆ

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ Model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลอีกทั้งยังเป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบง่ายสำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้น โดยแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ Model นั้นค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t พิจารณาจาก

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

โดยที่ k คือ สมการพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}k)}{\partial x} + \rho \frac{\partial (\bar{v}k)}{\partial y} + \rho \frac{\partial (\bar{w}k)}{\partial z} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3.12)$$

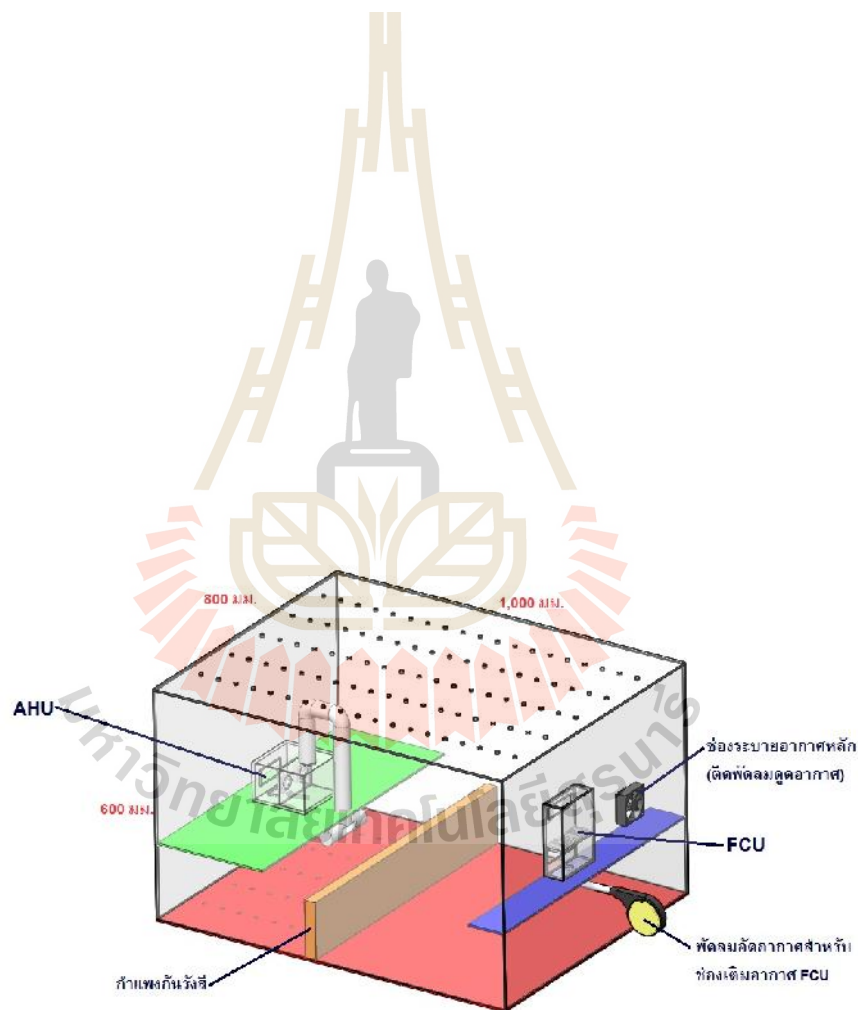
และ ε คือ สมการอัตราการกระจายพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}\varepsilon)}{\partial x} + \rho \frac{\partial (\bar{v}\varepsilon)}{\partial y} + \rho \frac{\partial (\bar{w}\varepsilon)}{\partial z} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\varepsilon} \mu_t \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$k - \varepsilon$ นี้เป็นสมการที่ใช้ประก เกับสมกา ย้โนล

โละล $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \varepsilon = 1.3$

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$



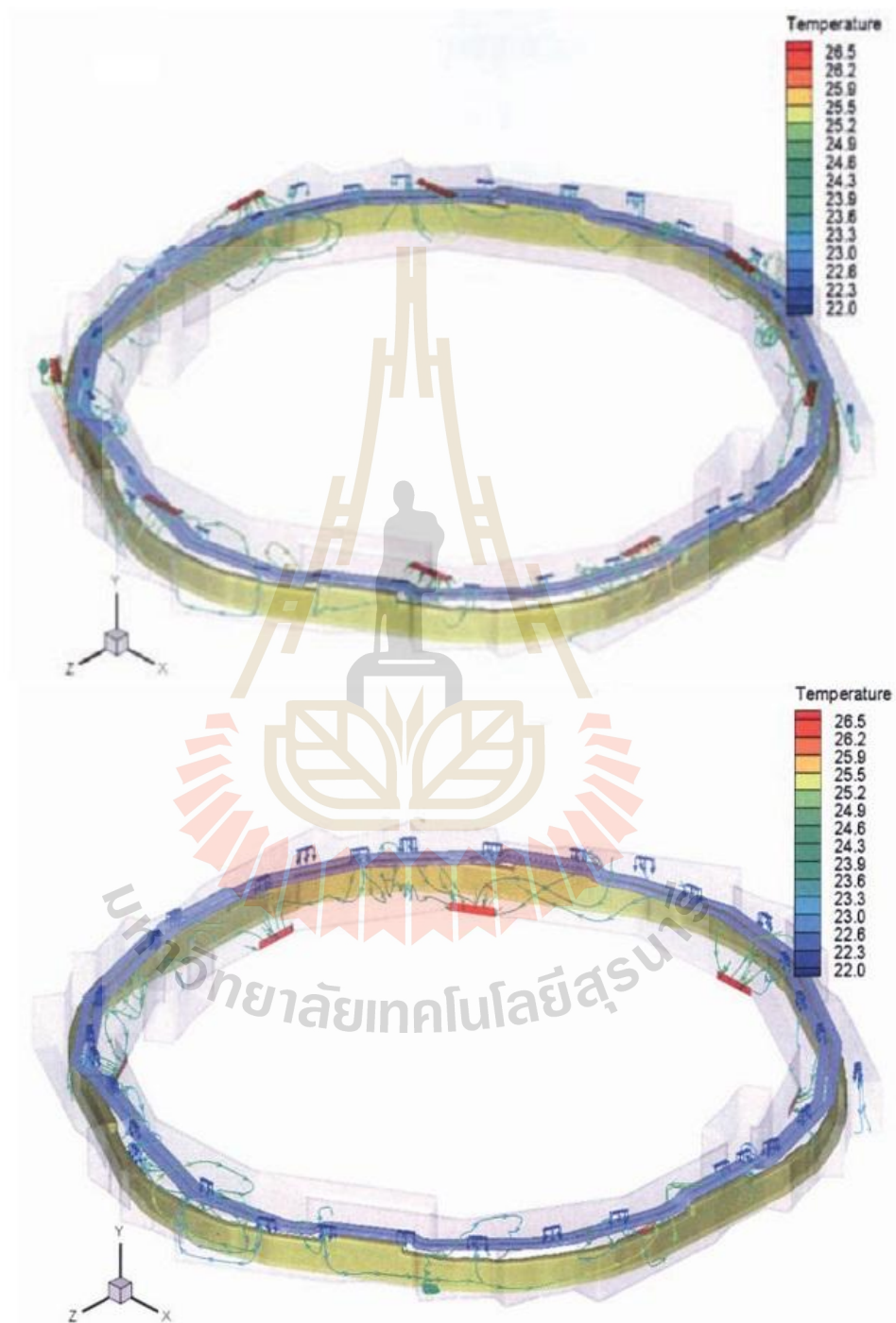
1. ที่ความสูงจากระดับพื้นล่าง 120 มิลลิเมตร ภายในบริเวณกำแพงกันรังสีฝั่ง AHU ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ติดตั้งอุปกรณ์ท่อลำเลียงอิเล็กทรอนิกส์
2. ที่ความสูงจากระดับพื้นล่าง 150 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ตรงกับทางออกของช่องจ่ายอากาศของ AHU
3. ที่ความสูงจากระดับพื้นล่าง 350 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระดับความสูงที่ตรงกับทางออกของช่องจ่ายอากาศของ FCU

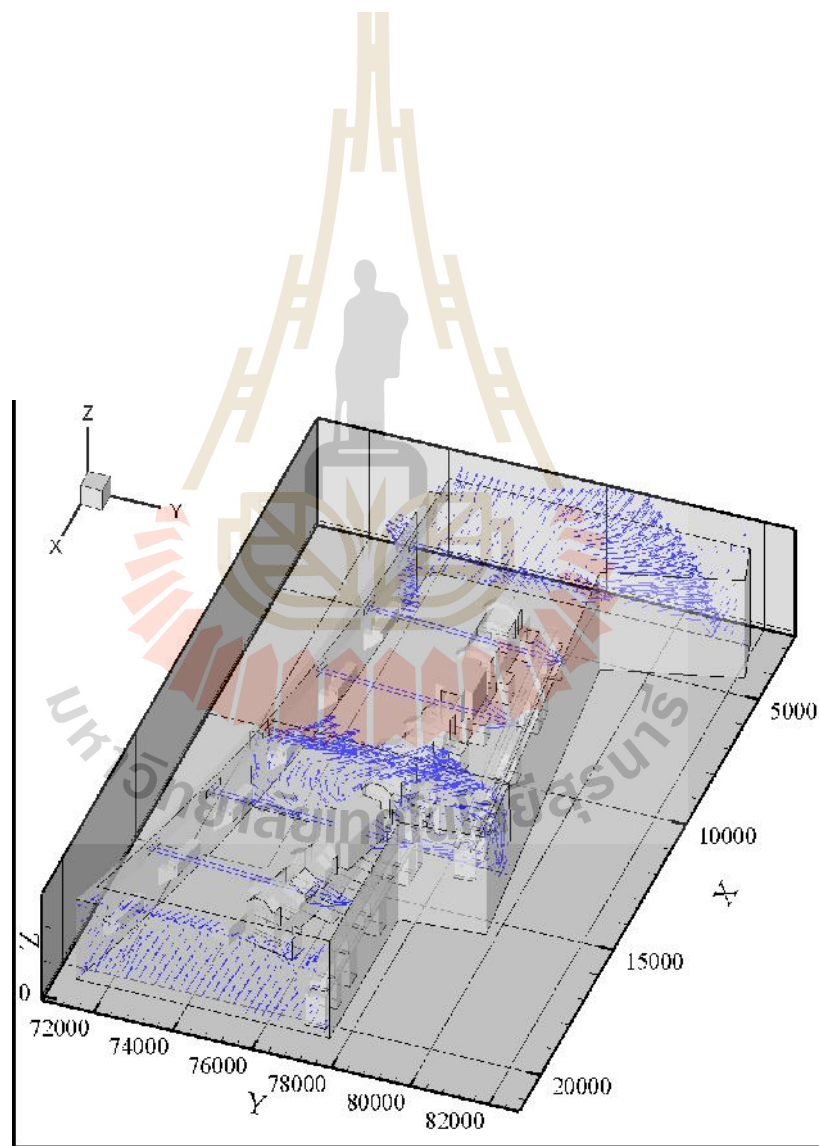
นำค่าที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง อันจะเป็นการสร้างความมั่นใจในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และเห็นถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระบบ

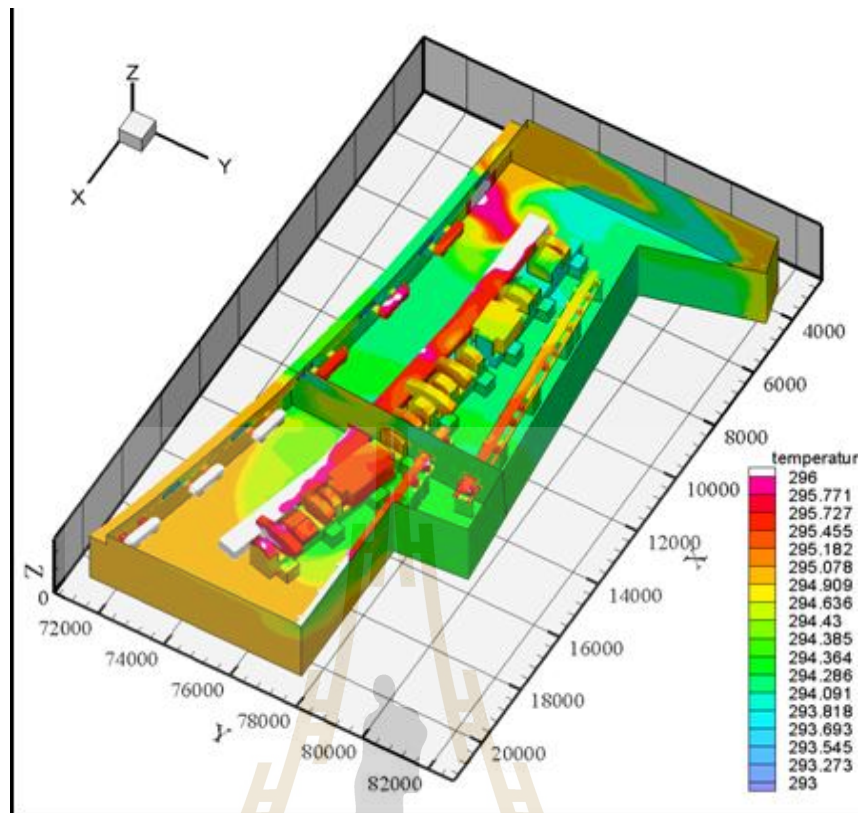
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การใช้กรรมวิธีทางตัวเลขจำลองระบบปรับอากาศวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

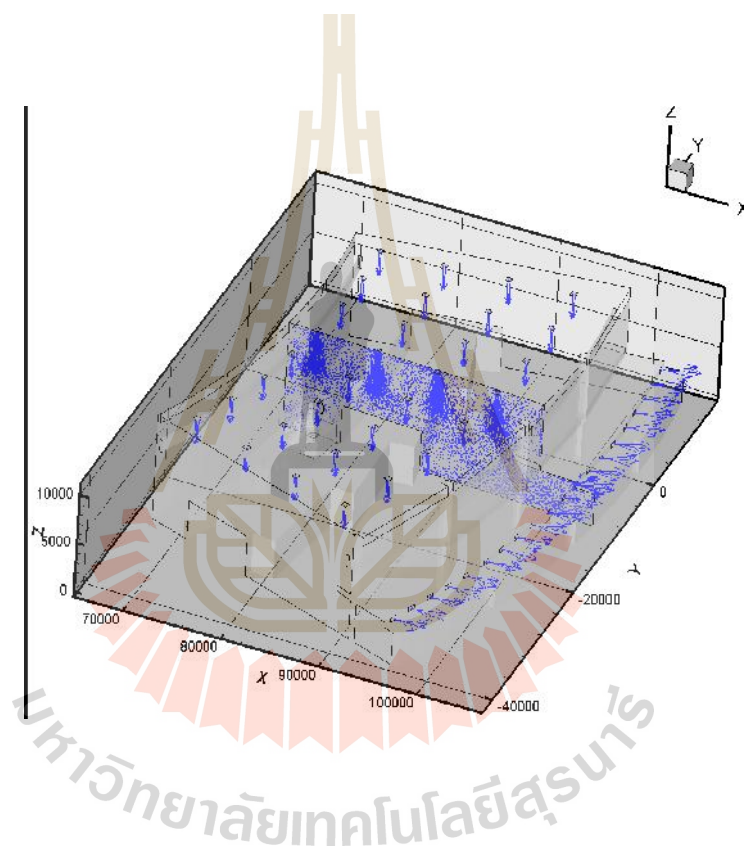
J. C. Chang และคณะ(2007) ทำการใช้กรรมวิธีทางตัวเลขจำลองระบบปรับอากาศภายในวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ(ได้หวัน) ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เทคนิค CFD จำลองการไหลแบบ 3 มิติและการกระจายตัวของอากาศในบริเวณดังกล่าว โดยได้ทำการจำลองผลของระบบจริงและระบบที่มีการปรับแต่ง เพื่อหวังผลของการไหลเวียนอากาศที่ดีขึ้น โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.2 ในการจำลองผล ภายใต้สมมุติฐาน รูปร่าง 3 มิติคงที่และเป็นปัญหาการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ รูปแบบการคำนวณแบบจำลองความปั่นป่วน k-ε มีการกำหนดความเร็วทางเข้าที่ตำแหน่งช่องลมจ่าย(Supply air) ส่วนที่ทางออกที่ตำแหน่งช่องลมกลับ(Return air) กำหนดเป็นแบบ Pressure Outlet อุปกรณ์บางอย่างเช่น Cable tray และ แม่เหล็ก กำหนดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ส่วนผนังทั้งหมดกำหนดให้ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน แบบจำลองสร้างจากขนาดจริงโดยมีเส้นรอบวง 120 เมตร สูง 2.8 เมตร โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบ คือ CASE A และ CASE B โดยที่ CASE A จะมีช่องลมจ่าย 16 ช่อง และช่องลมกลับ 8 ช่องกระจายตัวอยู่บนเพดานสอดคล้องกับตำแหน่งจริง ส่วน CASE B มีจำนวนช่องลมจ่าย และช่องลมกลับเท่ากัน แต่จะมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของช่องลมกลับไปจากเดิม จากผลการจำลองสำหรับ CASE A จะเห็นว่าเกิดปรากฏการณ์ Air Shortcut อย่างชัดเจน ทำให้ลมที่ออกจากช่องลมจ่ายไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ด้านล่างของวงแหวนกักเก็บ หรือไม่มีประสิทธิภาพพอในการดึงความร้อนออกจากแม่เหล็กและไหลความร้อนอื่นได้ สำหรับ CASE B มีการย้ายช่องลมกลับไปที่ด้านล่างผนังชั้นใน จากผลการจำลองเส้นการไหล จากช่องลมจ่ายถึงช่องลมกลับเห็นชัดว่ามีรูปแบบการไหลที่ดี

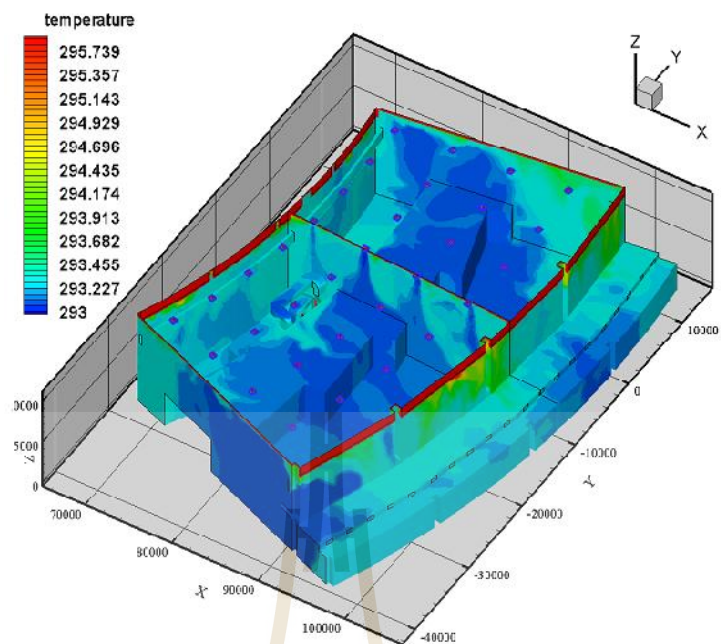






มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





Dr. Sarkar และ Sou

งานปรับอากาศด้วยโ

$k - \varepsilon$, $k - \omega$ และ

ซึ่งจะช่วยให้ได้

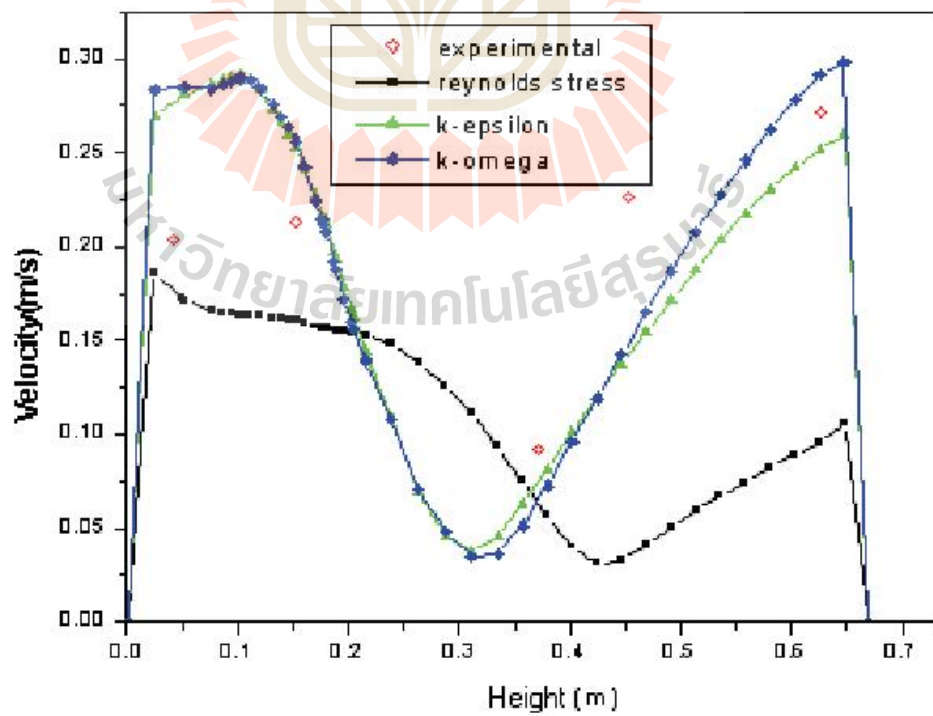
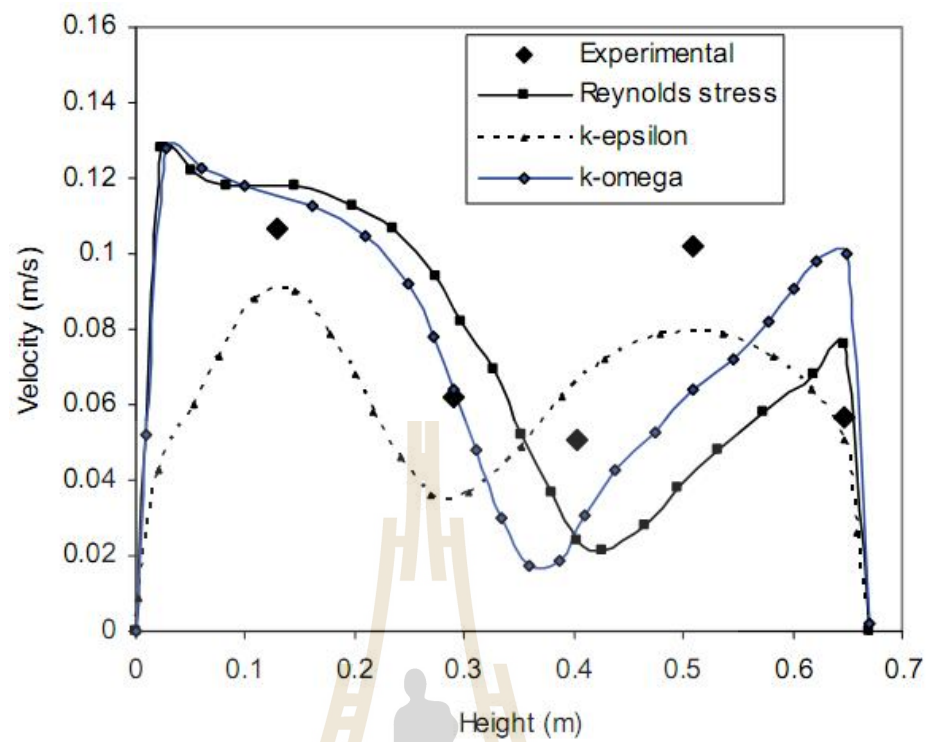
ลองผลกับ 3 รูปแบบ

จำลองที่ได้มาเปรียบ

$k - \varepsilon$, $k - \omega$ กับ

และ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

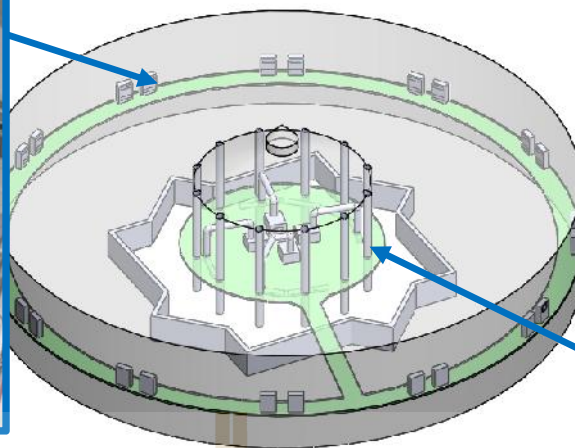
การศึกษานี้เป็นการจำลองพฤติกรรมการไหลเวียนอากาศ ภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซีเอฟดี เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของอากาศ ผลที่ได้จะนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ นำไปสู่แนวทางการปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศที่ให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

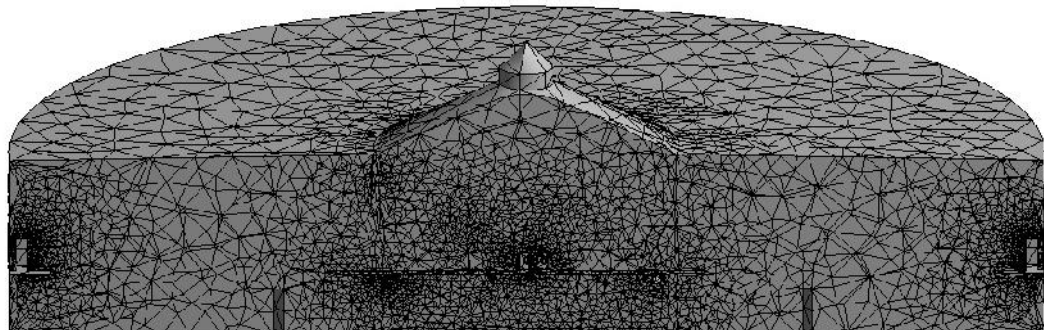
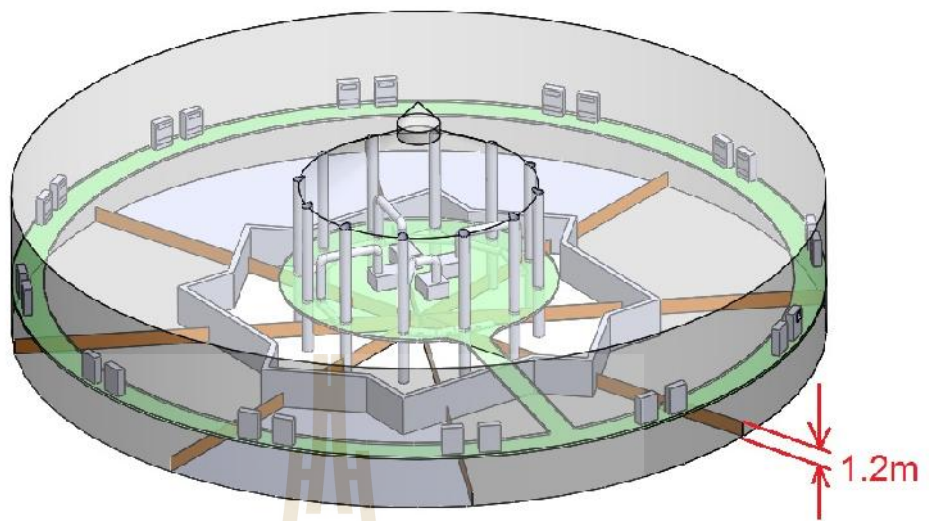
3.1 สถานที่การศึกษาวิจัย

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

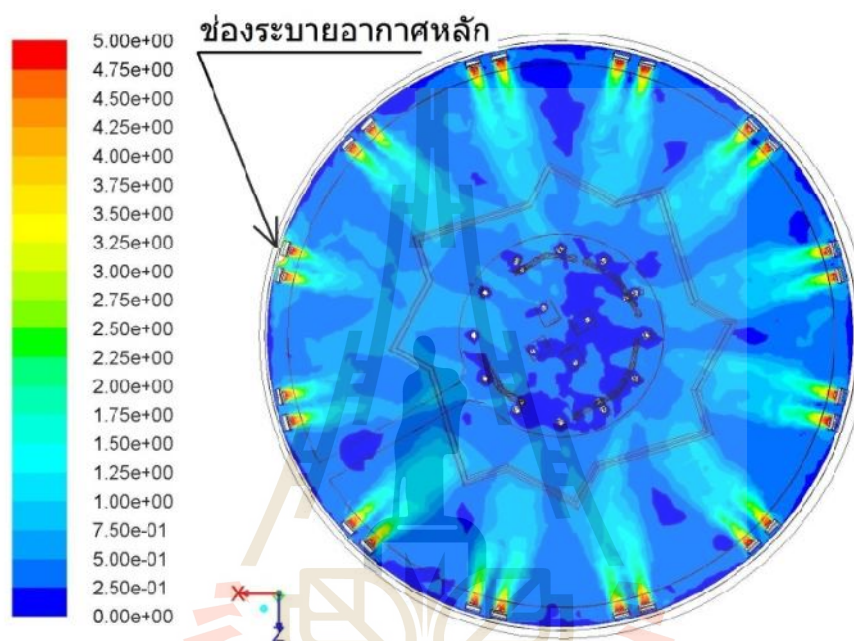
3.2.1 สร้างแบบจำลองทำการศึกษาและเก็บข้อมูลความเร็วลม อุณหภูมิ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับแบบจำลองและเปรียบ เทียบกับผลการจำลองซีเอฟดีที่ได้ ณ อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลอง สถาบันวิจัย-แสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา

ทำการสร้างแบบจำลองอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลอง 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks2013 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวอาคารมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เมตร มีพื้นที่ทั้งหมด 2,800 ตารางเมตร, หน่วยแฟนคอยล์(FCU) 24 ตัว ปรับอากาศให้กับบริเวณโถงทดลอง และ หน่วยเครื่องส่งลม(AHU) 4 ตัว ปรับอากาศให้กับวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีกำแพงกันรังสีสูง 3 เมตร แยกทั้ง 2 ส่วนออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

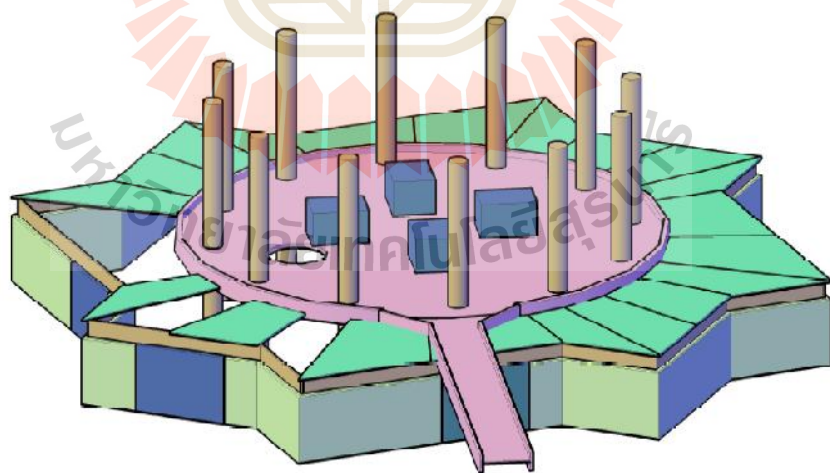
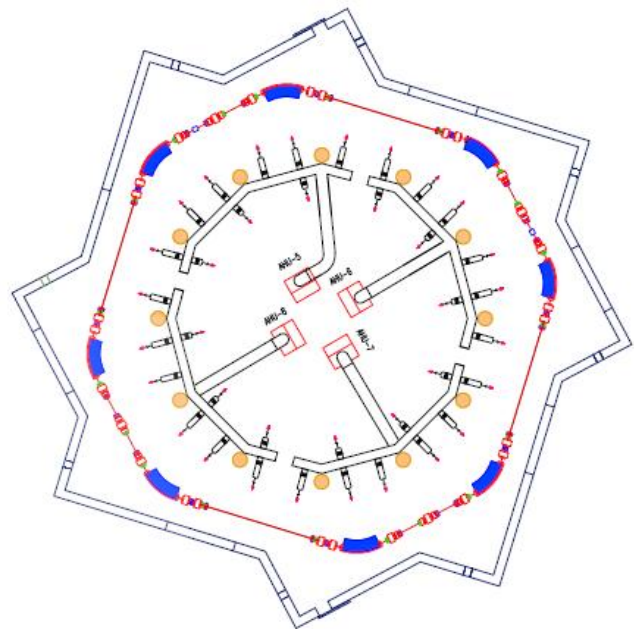
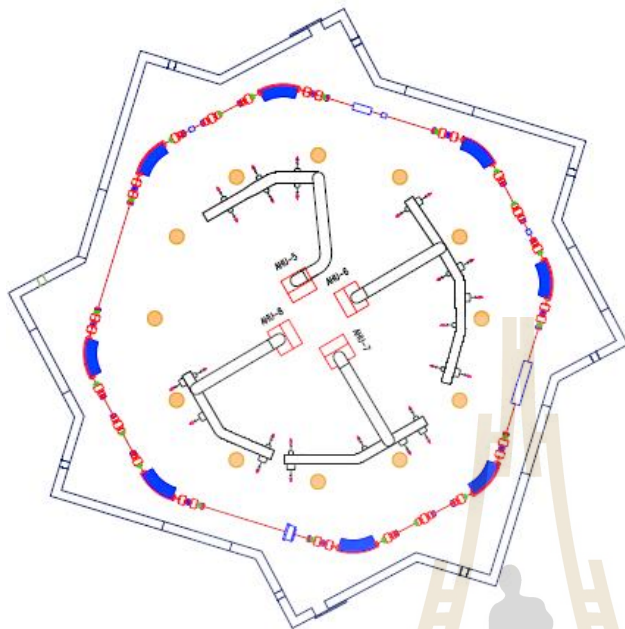


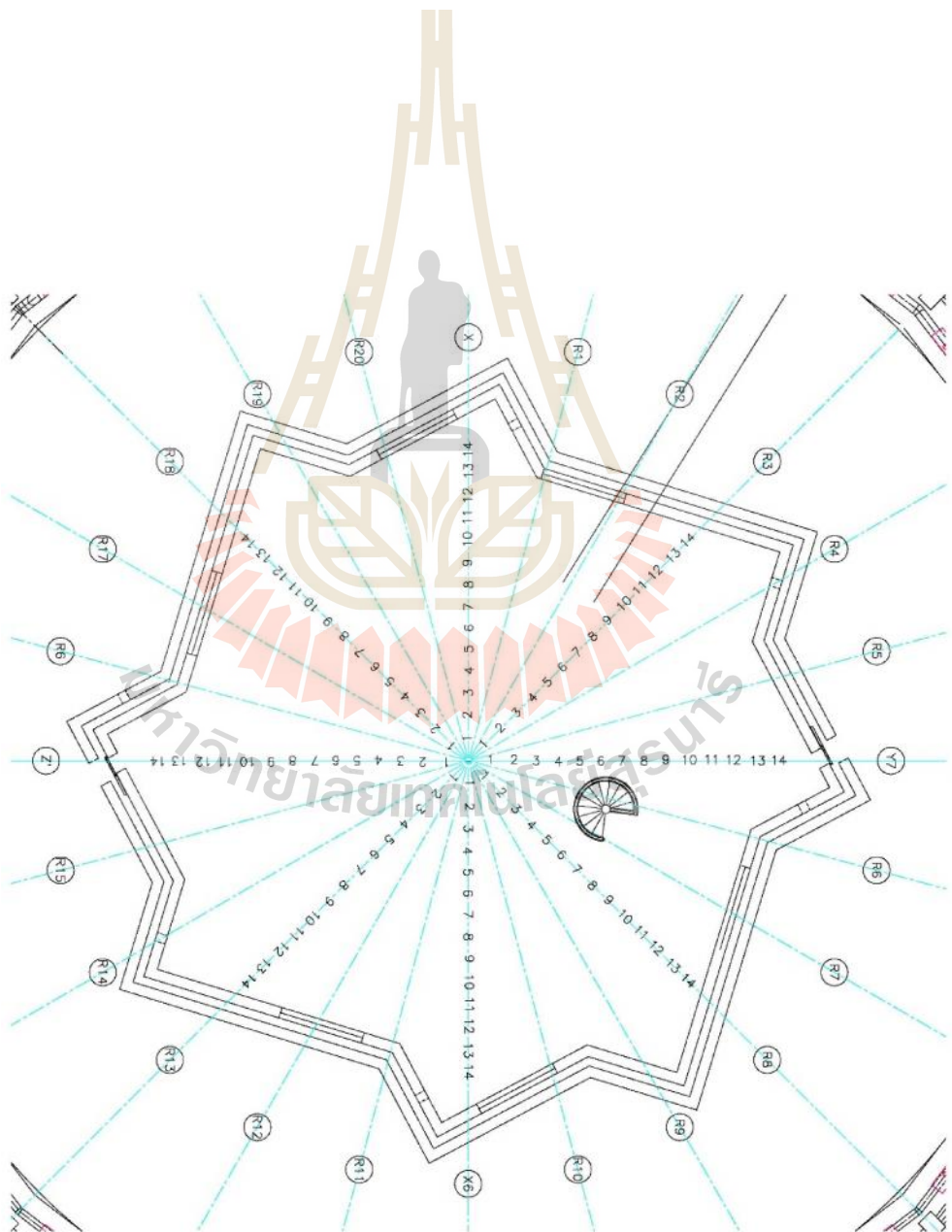


0 1e+004 2e+004 (mm)
5e+003 1.5e+004



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





บทที่ 4

แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

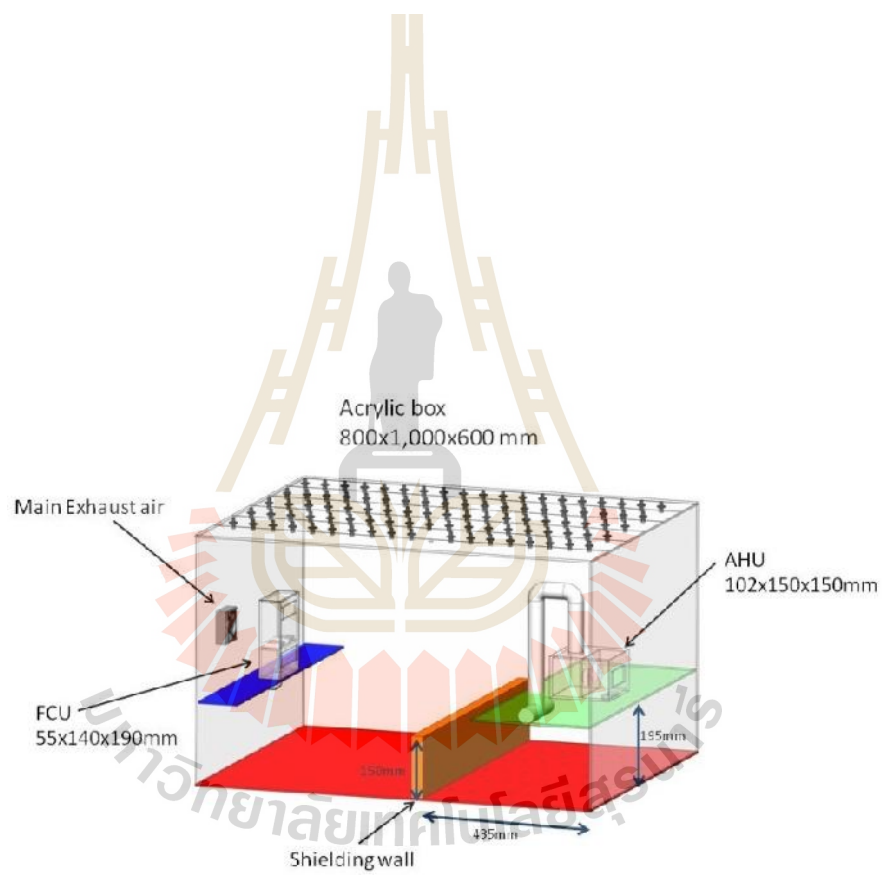
แบบจำลองเสมือนระบบปรับอากาศของอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์นี้ สร้างขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิ พฤติกรรมการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นข้อมูลที่สำคัญในการทำความเข้าใจถึงคุณลักษณะและประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ จากแบบจำลองนี้ได้ทำการจำลองพฤติกรรมการไหลใน 3 มิติโดยระเบียบวิธีคำนวณทางซีเอฟดี โดยใช้รูปแบบการไหล 3 แบบ คือ รูปแบบการไหลปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$, รูปแบบการไหลปั่นป่วน SST $k-\omega$ และรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ (จากการศึกษารูปแบบการไหลและเก็บวัดข้อมูลความเร็วของอากาศแบบจำลองพื้นที่ปิดขนาดเล็ก นำผลตรวจวัดที่ได้เปรียบเทียบกับผลจำลองทางคอมพิวเตอร์ CFD 3มิติ (3D Computational Fluid Dynamic) พบว่า ผลจำลอง CFD โดยใช้รูปแบบการไหลปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลแบบ Reynolds stress, J.Sarkar และ S.Mandal(2008) รูปแบบการไหลปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ถูกประยุกต์ในการจำลองผลความเร็วอากาศและอุณหภูมิของการไหลภายในแบบจำลองห้องทำงาน เปรียบเทียบข้อมูลการตรวจวัดกับผลจำลองโดยใช้รูปแบบการไหลมาตรฐาน $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ และรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ พบว่าแบบจำลองการไหลทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้รูปแบบการไหลปั่นป่วนแบบ SST $k-\omega$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลผลตรวจวัดมากที่สุด A. Stamou และ I. Katsiris(2005)) ผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากแบบจำลองเสมือน ซึ่งผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบข้อมูลจะถูกนำไปต่อยอดในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบปรับอากาศของอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน)

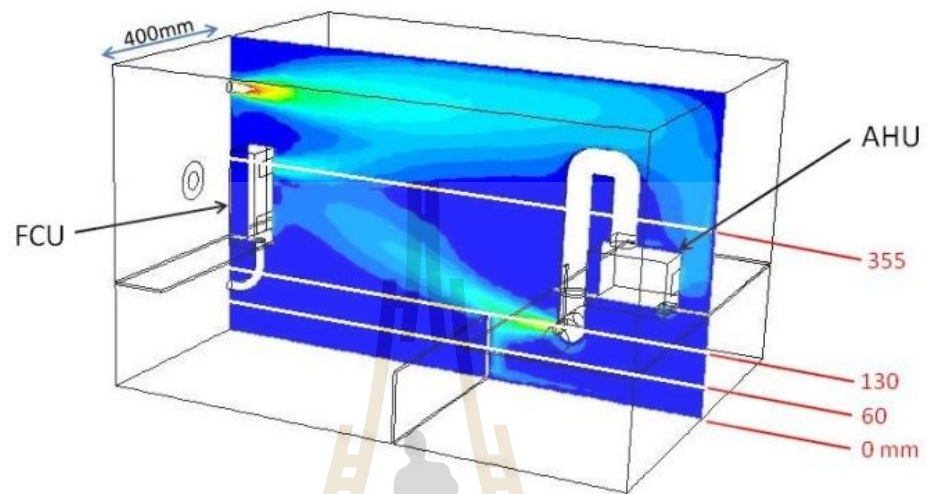
4.1 แบบจำลอง(Experimental Study)

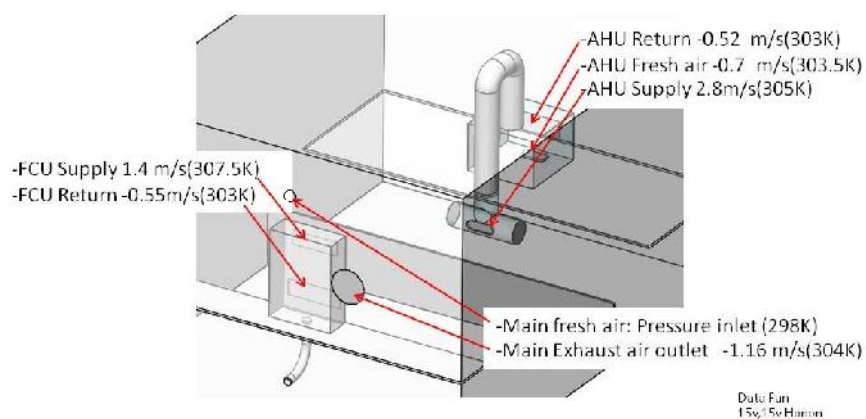
แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิกขนาด 800x1,000x600 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) ประกอบไปด้วย

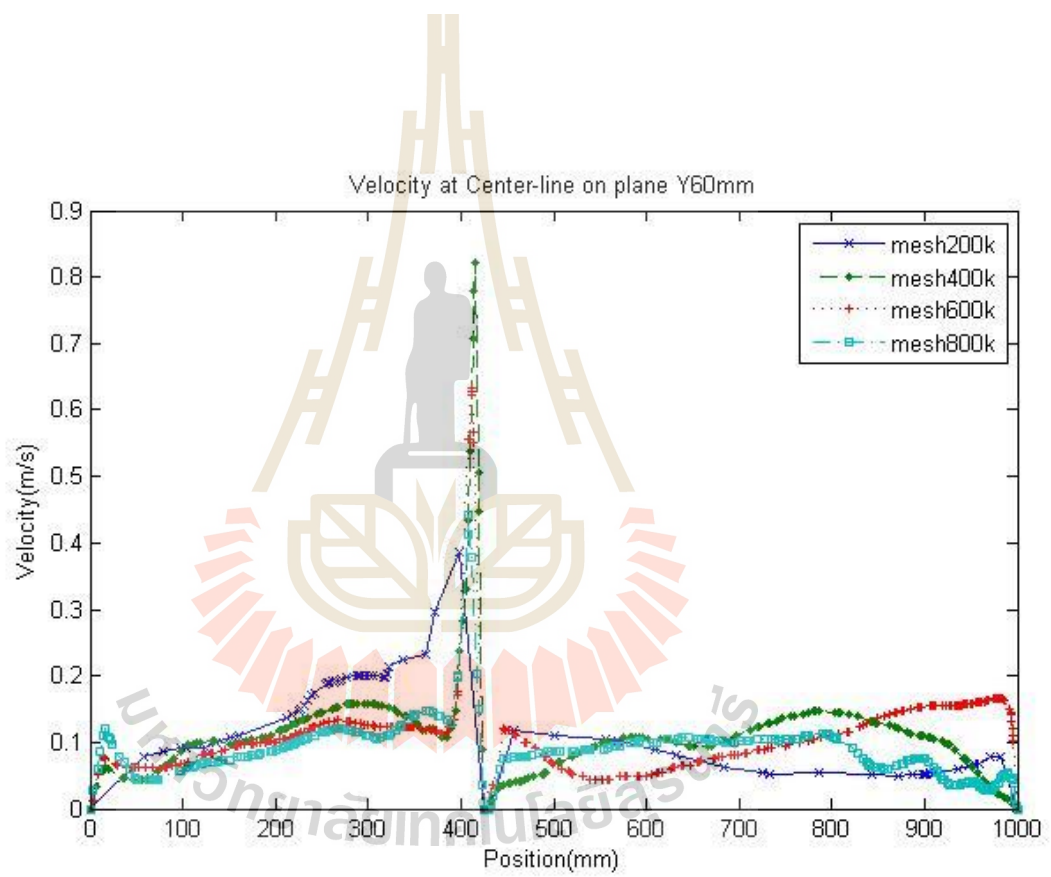
- 1.) ทางเข้าอากาศหรือเรียกว่าช่องเดิมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร

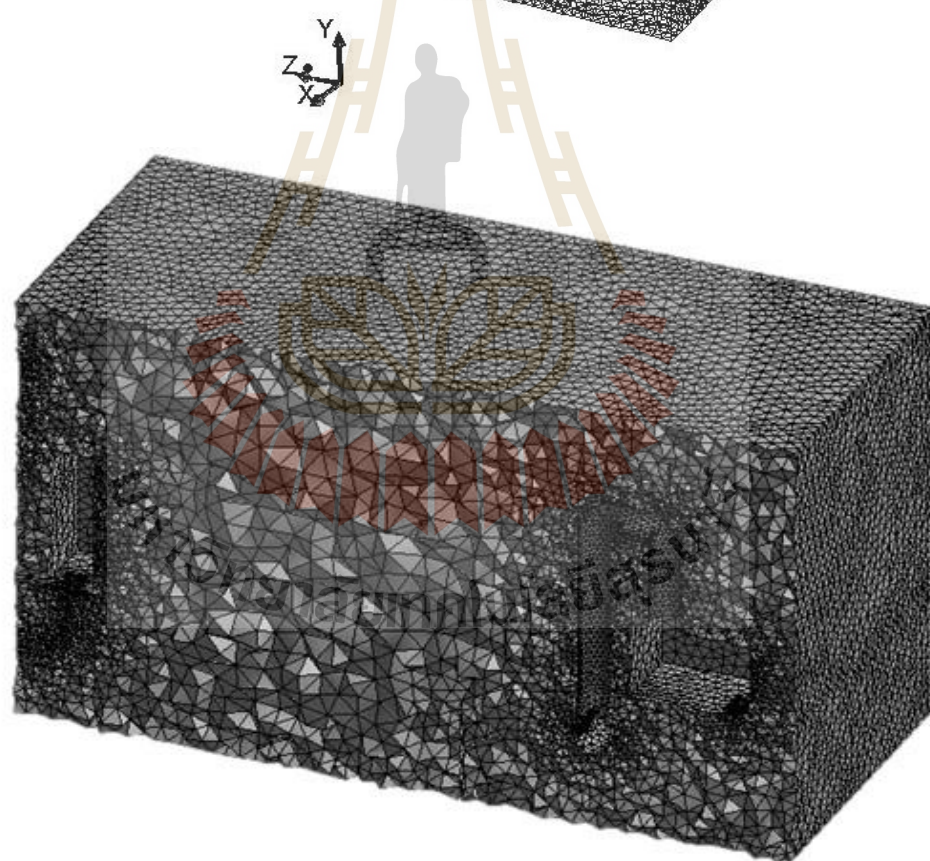
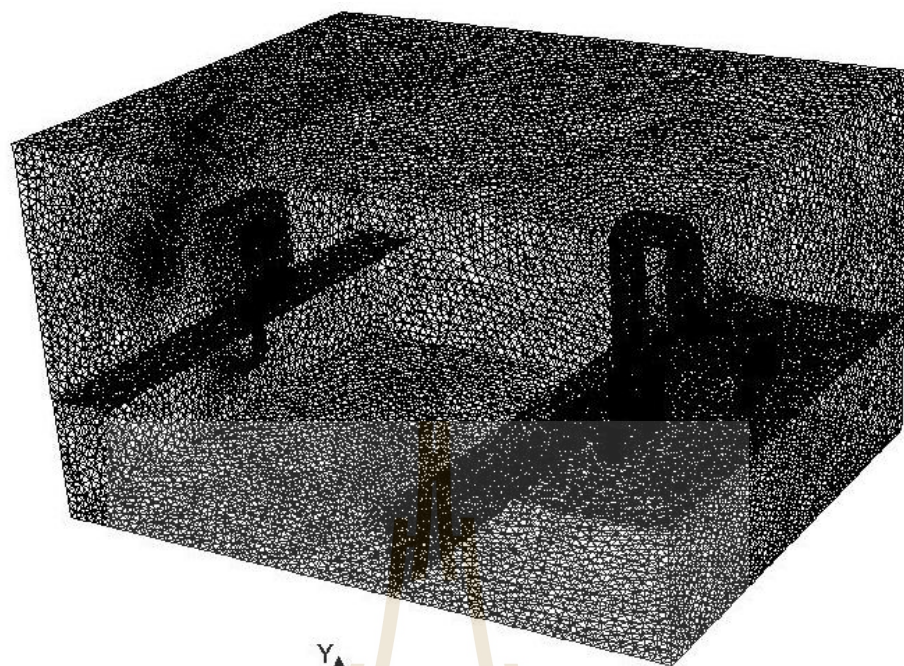
1 ช่อง

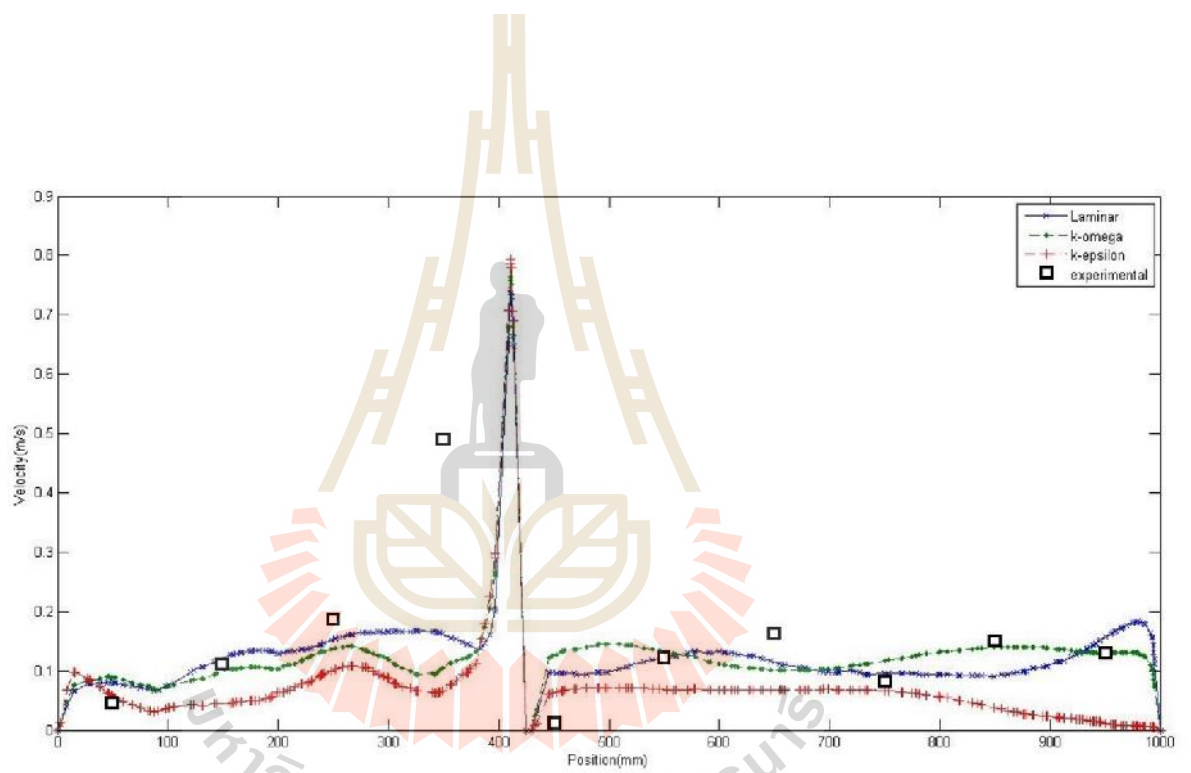


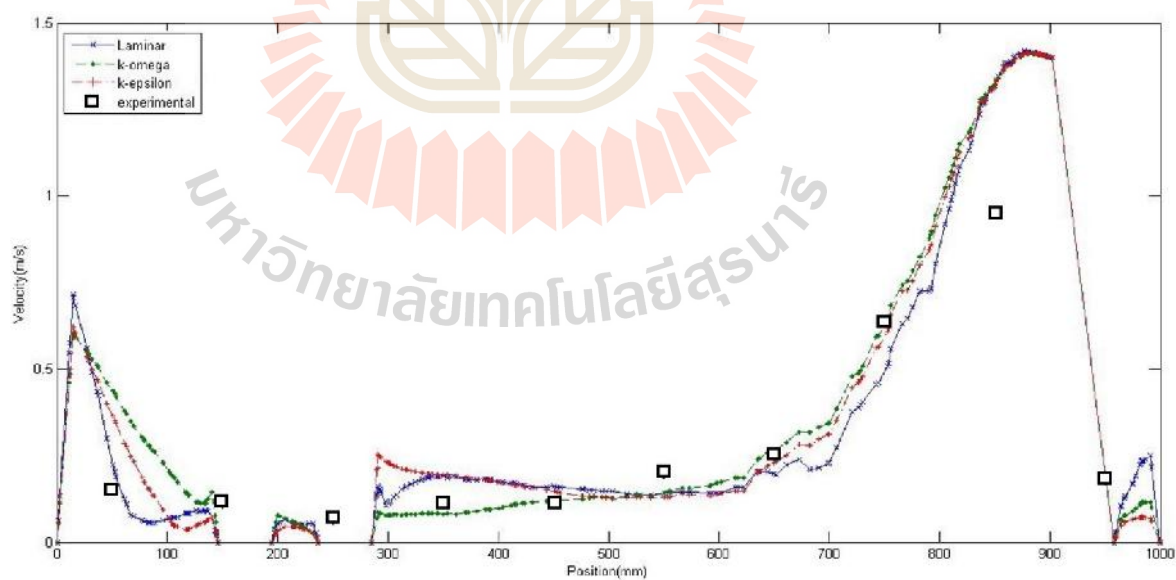
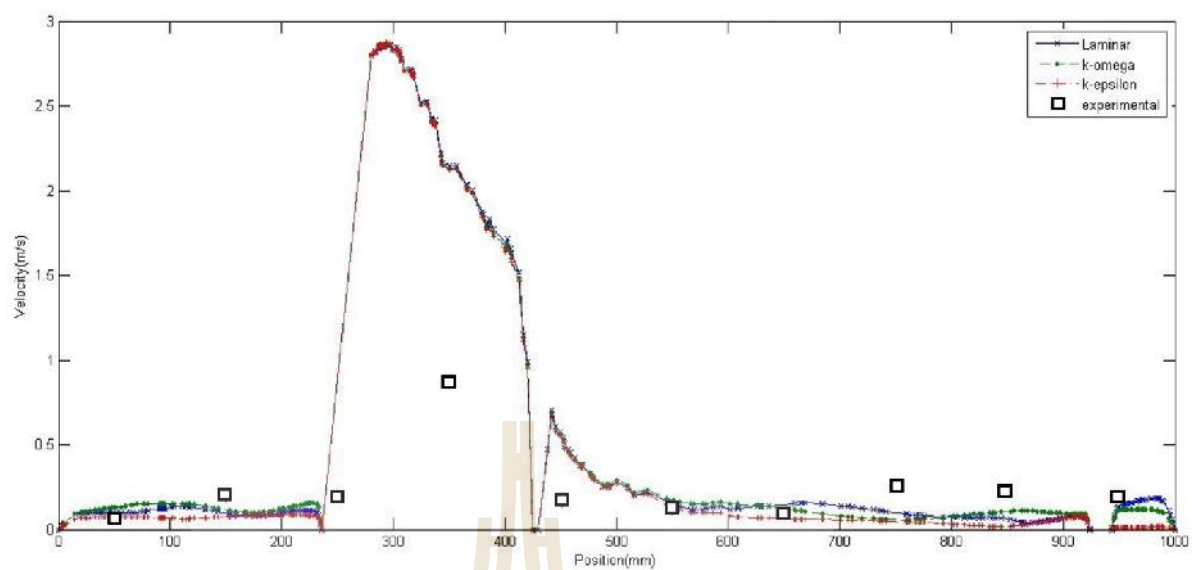


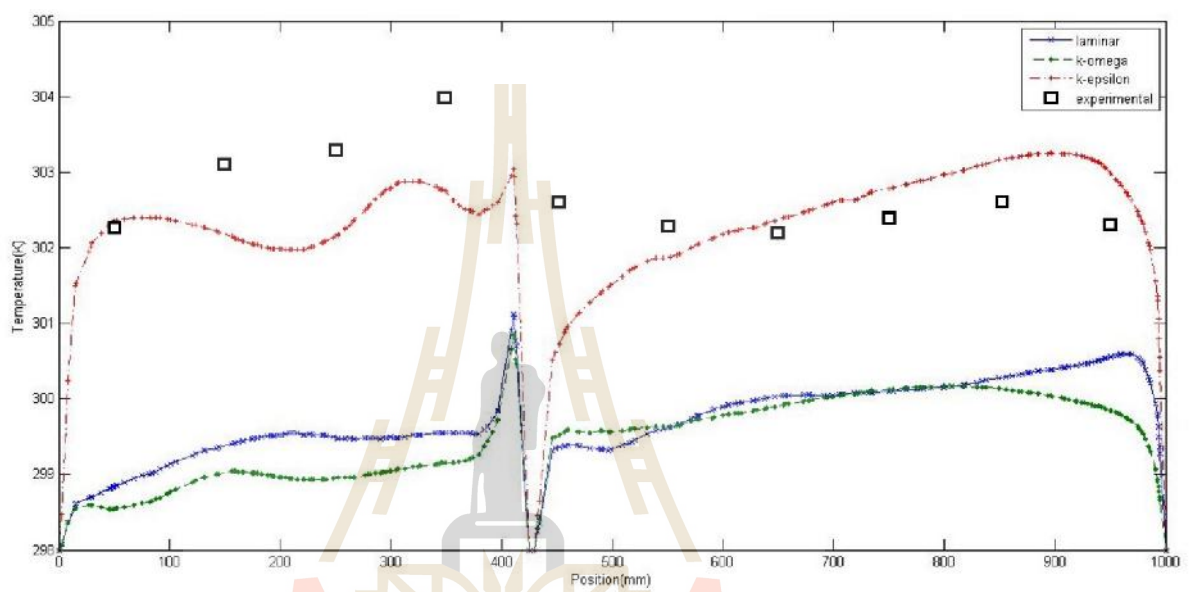




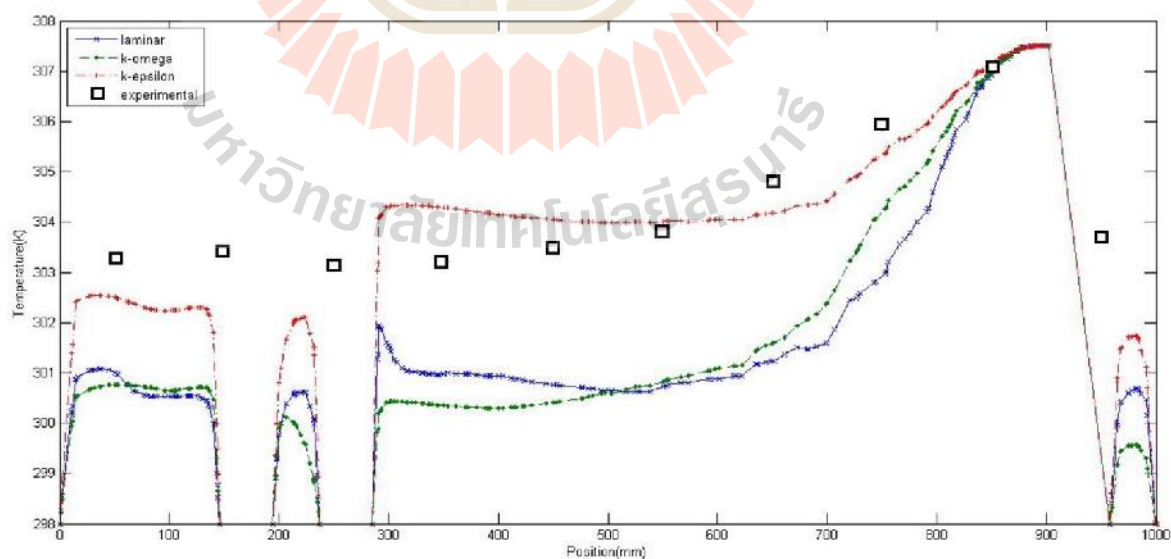
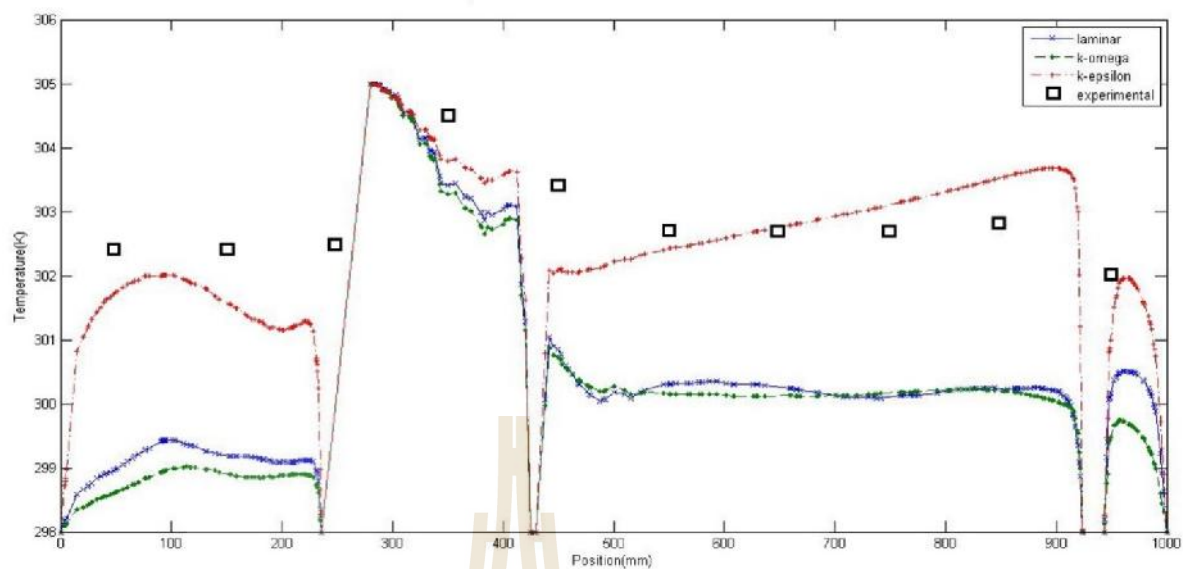








มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



4.4 สรุปการเปรียบเทียบผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองเสมือนระบบปรับอากาศของห้องปฏิบัติการแสงสยาม (จังหวัด-นครราชสีมา) โดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณทางซีเอฟดีที่มีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน 3 แบบ คือรูปแบบการไหลปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$, รูปแบบการไหลปั่นป่วน SST $k-\omega$ และรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ จำลองพฤติกรรมการกระจายตัวของอากาศ แล้วนำผลจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการวัด จากการศึกษาพบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน SST $k-\omega$ ให้ผลการจำลองความเร็วของอากาศสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$, และแบบราบเรียบ ส่วนเมื่อดูที่อุณหภูมิพบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\epsilon$ ให้ผลการจำลองสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบปั่นป่วน SST $k-\omega$, และแบบราบเรียบ ผลการศึกษานี้จะถูกนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายความเร็วและอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร ซึ่งจะนำไปสู่การหาแนวทางปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศ และการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ



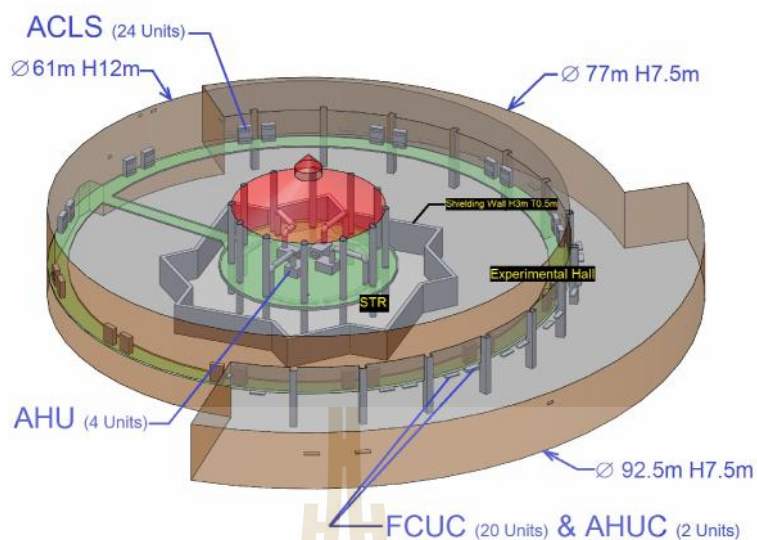
บทที่ 5

พฤติกรรมการไหลของอากาศในสภาวะปัจจุบัน

สำหรับบทนี้นำเสนอการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโรงทดลองในสภาวะปัจจุบัน (มิถุนายน-กรกฎาคม 2558) โดยได้ทำการเก็บวัดข้อมูลความเร็วลมและอุณหภูมิ ช่องทาง เข้า-ออก อากาศภายในอาคารฯ แล้วนำค่าที่ได้ป้อนเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำผลจำลองที่ได้เทียบกับผลการวัด ณ ตำแหน่งต่างๆภายในอาคาร เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

5.1 อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอาคารลักษณะทรงกระบอก 3 ทรง ซ้อนทับกัน โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1.ตัวอาคารเดิม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 61 เมตร สูง 12 เมตร และ 2.) ส่วนต่อขยาย เส้นผ่านศูนย์กลาง 77 เมตร และ 92.5 เมตร สูง 7.5 เมตร โครงสร้างอาคารเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ผนังคอนกรีต หลังคาอาคารมุงด้วยวัสดุแผ่นเหล็กบางชุบสังกะสี(Metal Sheet) ส่วนกลางของอาคารเป็นส่วนติดตั้งอุปกรณ์วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยแม่เหล็กของเครื่องเร่งอนุภาค และอุปกรณ์ส่วนหน้า(Front End) โดยมีกำแพงรูปดาว 8 แฉก ทำจากคอนกรีตหนา 50 เซนติเมตร สูง 4 เมตร เพื่อทำหน้าที่กันรังสีจากอุปกรณ์กักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ และแยกส่วนออกจากบริเวณระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง ซึ่งเรียกพื้นที่นี้ว่าโรงทดลอง(Experimental floor)(รูปที่ 5.1)

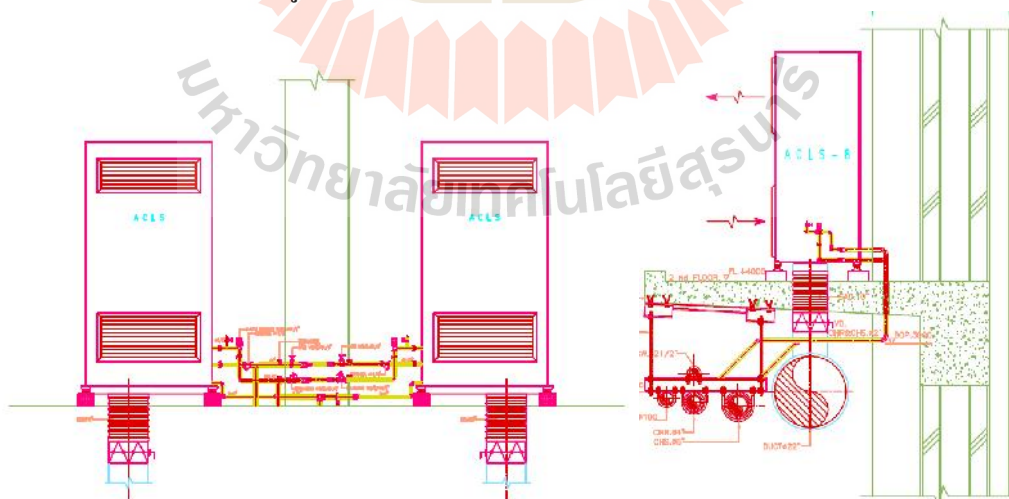


รูปที่ 5.1 อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโรงทดลอง

5.1.1 ระบบปรับอากาศภายในอาคาร

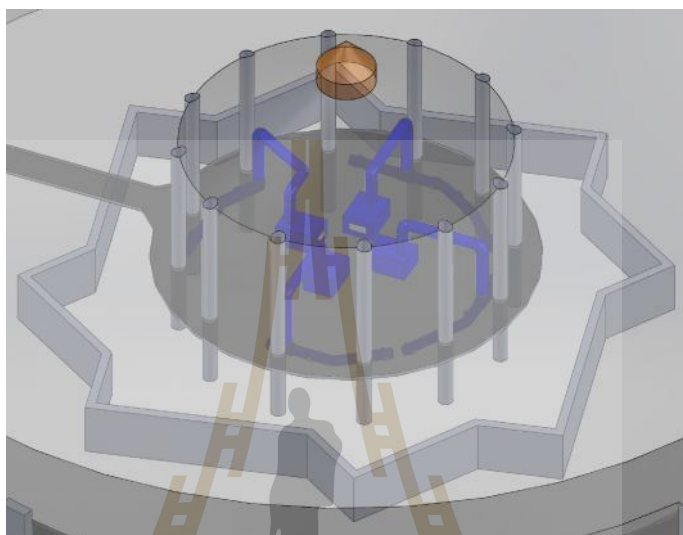
ระบบปรับอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย

- 1.) ACLS จำนวน 24 ตัวกระจายตัวอยู่โดยรอบอาคาร ทำหน้าที่รับอากาศที่ปรับอุณหภูมิแล้วเพื่อเติมอากาศใหม่ให้อาคารจาก AHU2 ภายในห้องเครื่อง และหมุนเวียนปรับอากาศภายในบริเวณ โรงทดลอง(รูปที่5.2)



รูปที่ 5.2 ACLS ที่วางตัวอยู่โดยรอบของตัวอาคาร

2.) AHU (Air Handling Unit) หมายเลข 5-8 ทำหน้าที่ปรับอากาศ บริเวณภายในกำแพงกันรังสี ซึ่งเป็นที่อยู่ของอุปกรณ์กักเก็บอิเล็กตรอน มีจำนวนทั้งหมด 4 ตัว วางอยู่บนชั้นลอยบริเวณกึ่งกลางอาคาร ปรับอากาศจากชั้นลอยส่งลมไปตามท่อที่วางตัวอยู่ใต้ชั้นลอยเพื่อกระจายลมไปในบริเวณโดยรอบ (รูปที่ 5.3)



รูปที่ 5.3 AHU ทำหน้าที่ปรับอากาศบริเวณภายในพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน

3.) FCUC-AHUC (Fan Coil Unit and Air Handling Unit Section-C) ทำหน้าที่ปรับอากาศบริเวณส่วนต่อขยาย ประกอบด้วย FCUC จำนวน 20 ตัว และ AHUC จำนวน 2 ตัว (รูปที่ 5.4)



รูปที่ 5.4 FCUC และ AHUC ทำหน้าที่ปรับอากาศบริเวณส่วนต่อขยาย

4.) ช่องทางออกอากาศ ในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโรง
ทดลองมีช่องทางออกของอากาศทั้งหมดดังนี้(รูปที่5.5)

4.1) Control room ส่งอากาศจากบริเวณโรงทดลองเข้าสู่ห้องควบคุม

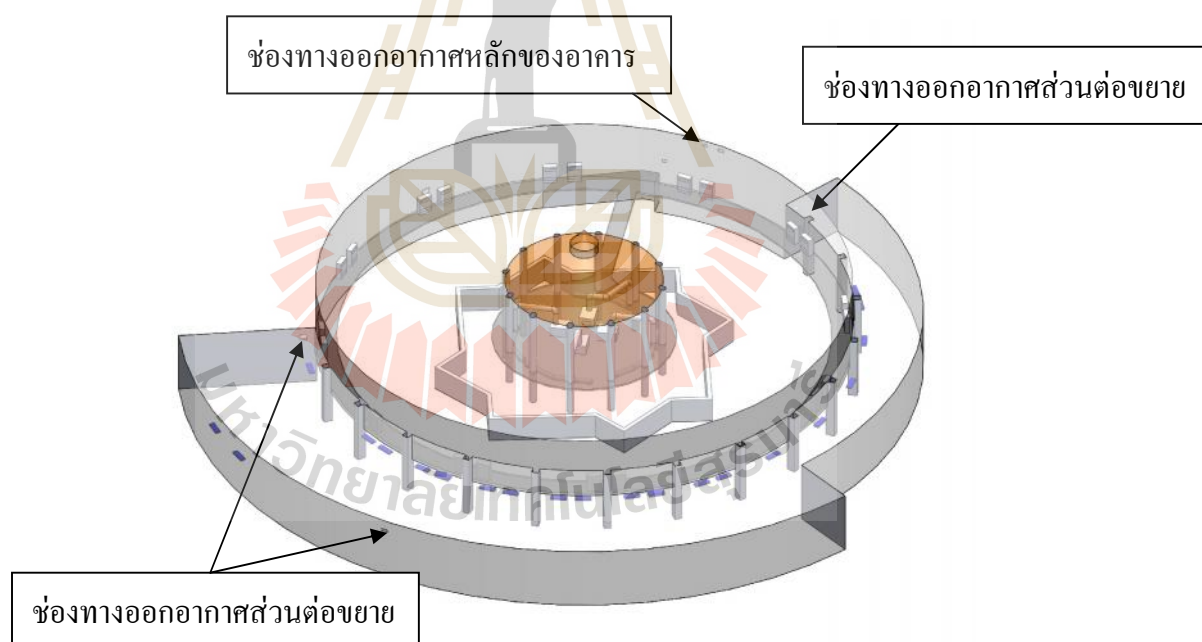
4.2) Corridor 1st floor ส่งอากาศจากบริเวณโรงทดลองให้กับทางเดิน
เชื่อมต่ออาคารที่ชั้นที่ 1

4.3) Corridor 2nd floor ส่งอากาศจากบริเวณโรงทดลองให้กับทางเดิน
เชื่อมต่ออาคารที่ชั้นที่ 2

4.4) Machine room ส่งอากาศกลับห้องเครื่องเพื่อทำการปรับอุณหภูมิและ
ผสมกับอากาศใหม่จากภายนอกเพื่อส่งกลับ ACLS ใหม่เป็นวงรอบ

4.5) Extend-Area Exhaust ช่องระบายอากาศในส่วนต่อขยาย

4.6) Main Exhaust (EFS2EX) ช่องระบายอากาศหลักของอาคารวงแหวน
กักเก็บอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5.5 ช่องทางออกอากาศภายในอาคาร

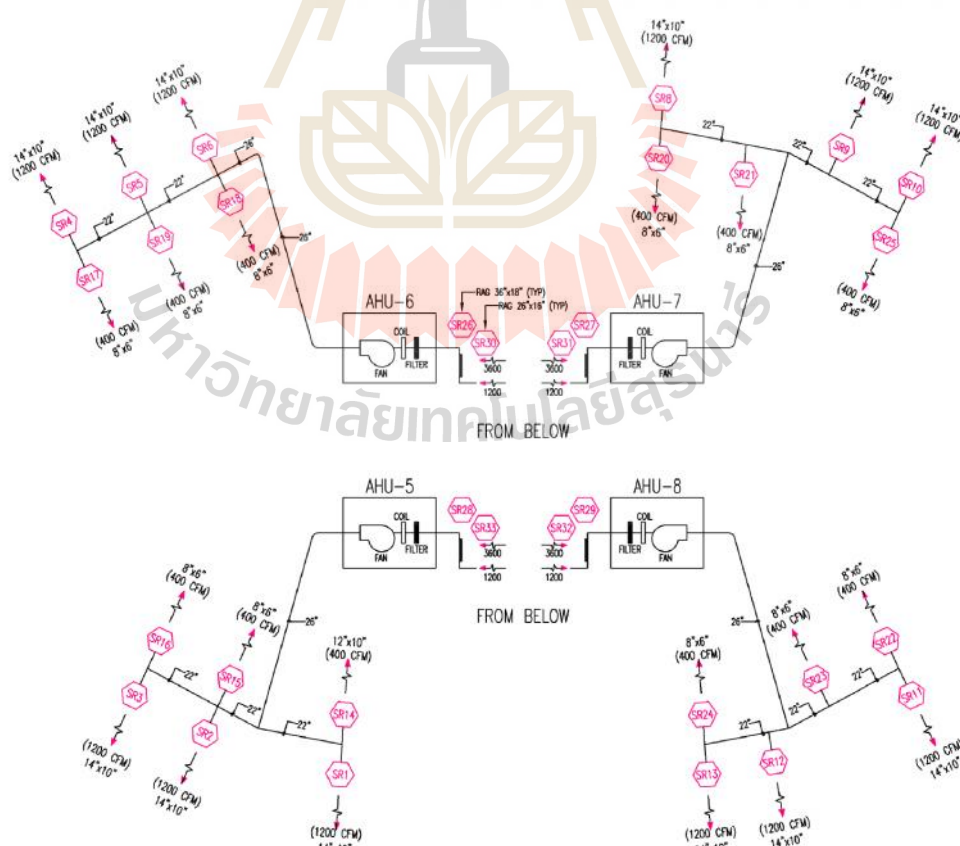
5.1.2 ค่าการออกแบบระบบปรับอากาศภายในอาคาร

พื้นที่ปรับอากาศภายในอาคารมีอยู่ด้วยกันหลายส่วน แต่ในที่นี้จะขอศึกษาและนำเสนอเพียง 3 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโรงทดลองดังนี้

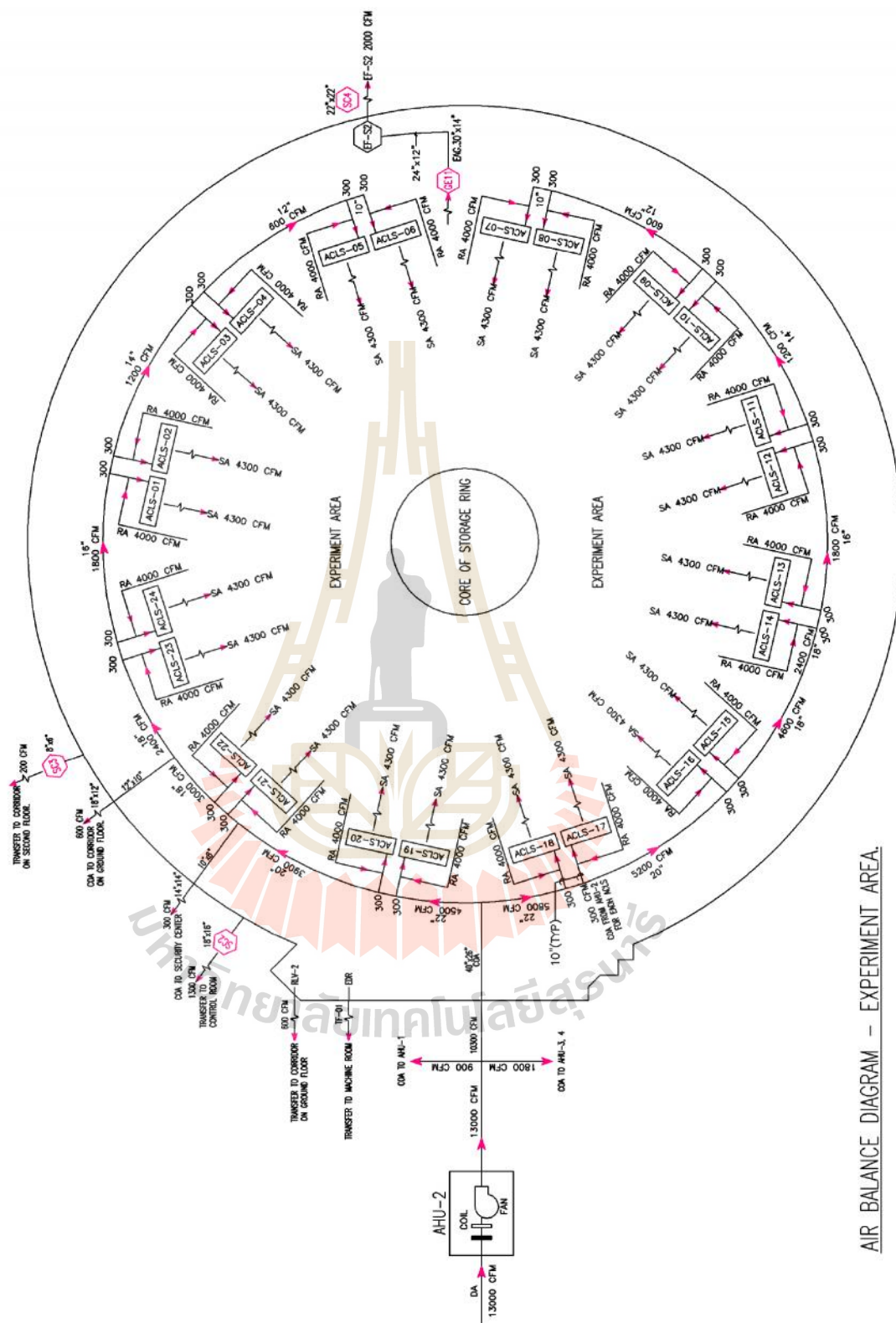
1.) พื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์(Storage ring) มีอุปกรณ์ปรับอากาศ AHU(Air Handling Unit) จำนวน 4 ตัว คือ AHU หมายเลข 5, 6, 7 และ 8 ขนาดทำความเย็น 180,000 BTUH/ตัว แบ่งหน้าที่ทำความเย็นในพื้นที่ออกเป็น 4 ส่วน ตามแผนผัง รูปที่ 5.6

2.) พื้นที่โรงทดลอง(Experimental area) มีอุปกรณ์ AHU#2 ขนาดทำความเย็น 1,037,000 BTUh คังอากาศบริสุทธิ์จากนอกอาคาร ทำการปรับอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นให้ได้ตามต้องการแล้วส่งจ่ายให้อุปกรณ์ปรับอากาศ ACLS จำนวน 24 ตัว(ขนาดทำความเย็น 94,000 BTUh/ตัว) ที่วางตัวอยู่โดยรอบอาคารดังแผนภาพการสมดุลอากาศรูปที่ 5.7

3.) พื้นที่ส่วนขยายโรงทดลอง (Extension Area) ประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับอากาศ FCU-C(Fan Coil Unit Zone C) จำนวน 20 ตัว และ AHU-C(Air Handling Unit Zone C) จำนวน 2 ตัว ขนาดทำความเย็นรวม 150 ton-hour วางตัวอยู่โดยรอบส่วนต่อขยายของโรงทดลอง ดังแผนภาพการสมดุลอากาศรูปที่ 5.8

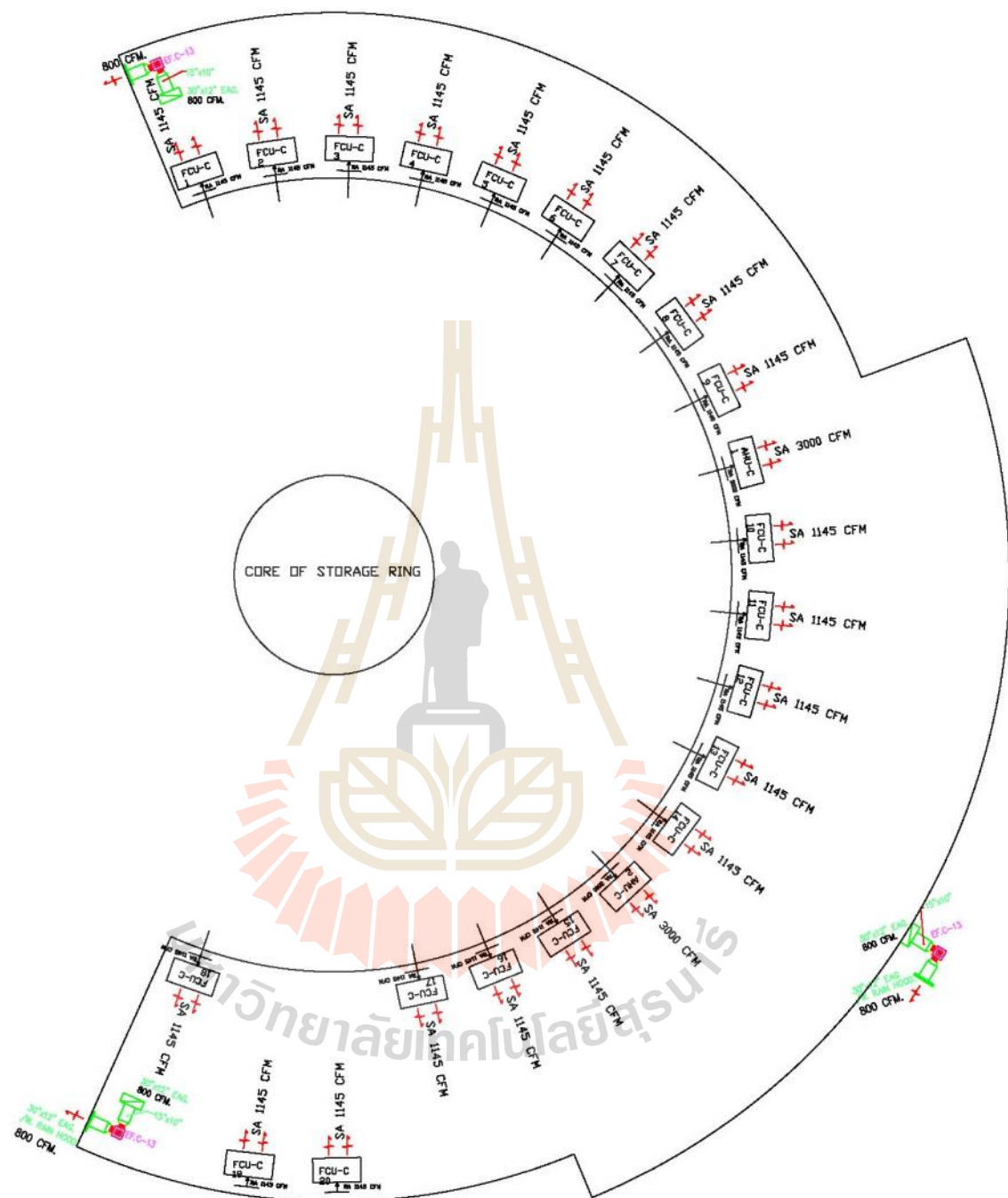


รูปที่ 5.6 แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์



AIR BALANCE DIAGRAM - EXPERIMENT AREA

รูปที่ 5.7 แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่ห้องทดลอง



AIR BALANCE DIAGRAM
EXTENSION AREA

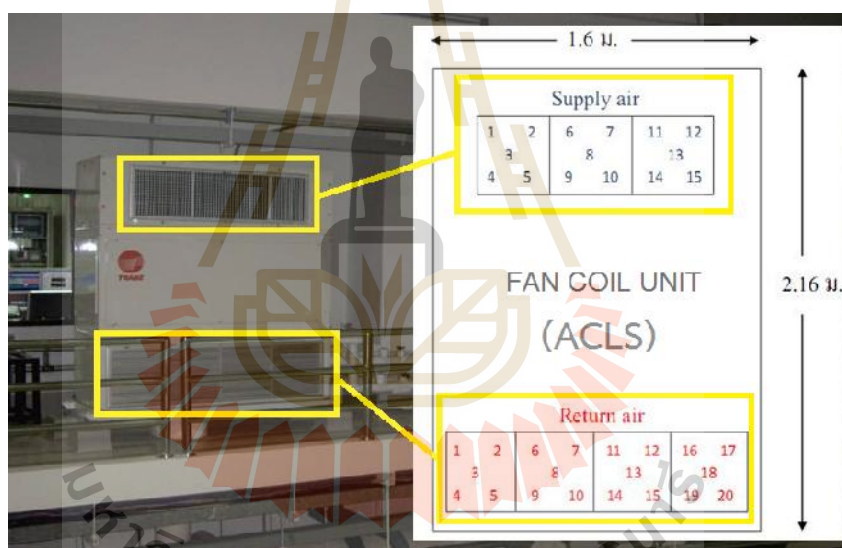
รูปที่ 5.8 แผนผังสมดุลอากาศพื้นที่ส่วนต่อขยายโรงทดลอง

5.2 การตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วอากาศ

การตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบ่งการตรวจวัดเป็น 2 ชุดข้อมูล คือ

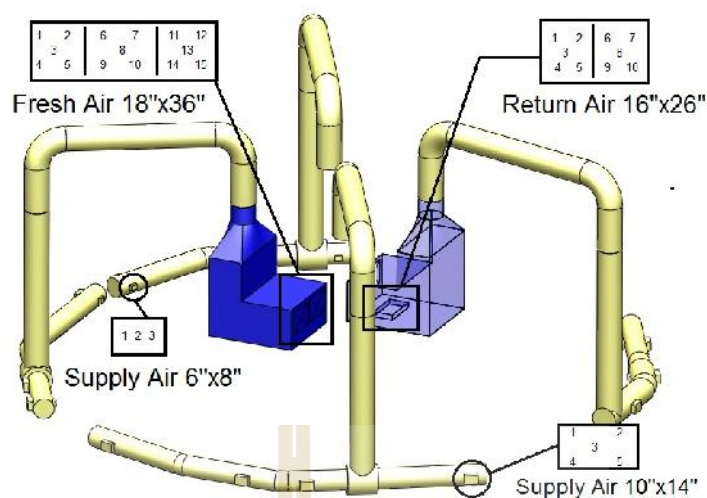
1.) การเก็บวัดข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วบริเวณช่องทางเข้าออกอากาศของอุปกรณ์ปรับอากาศ และบริเวณช่องทางออกอากาศ(exhaust) ของตัวอาคารเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

1.1) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ ของ ACLS ทั้ง 24 ตัว ที่กระจายอยู่โดยรอบของอาคาร โดยแบ่งการตรวจวัดที่ช่องลมจ่าย เป็น 3 ชุดข้อมูล ทั้งหมด 15 ค่า และการตรวจวัดที่ช่องลมกลับ 4 ชุดข้อมูล ทั้งหมด 20 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับป้อนเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (วิธีการวัดอิงตามมาตรฐาน ANSI/ASHRAE 41.2-1987(RA 92)(ASHREA, 1992) รูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ ACLS

1.2) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ ของ AHU ทั้ง 4 ตัว ที่ตั้งอยู่บนชั้นลอยบริเวณกึ่งกลางอาคาร แบ่งการตรวจวัดที่ช่องลมจ่าย เป็น 3 และ 5 ค่า ขึ้นตามขนาดของช่องจ่ายอากาศ ทำการตรวจวัดที่ช่องลมกลับ 2 ชุดข้อมูล ทั้งหมด 10 ค่า และการตรวจวัดที่ช่องเติมอากาศใหม่(Fresh air) 3 ชุดข้อมูล ทั้งหมด 15 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับป้อนเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ AHU

1.3) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ ของ FCU-C (18ตัว) และ AHU-C(2 ตัว) โดยมีการตรวจวัดที่ช่องลมจ่าย เป็น 8 ค่า และการตรวจวัดที่ช่องลมกลับ 6 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการจำลองโดยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5.11



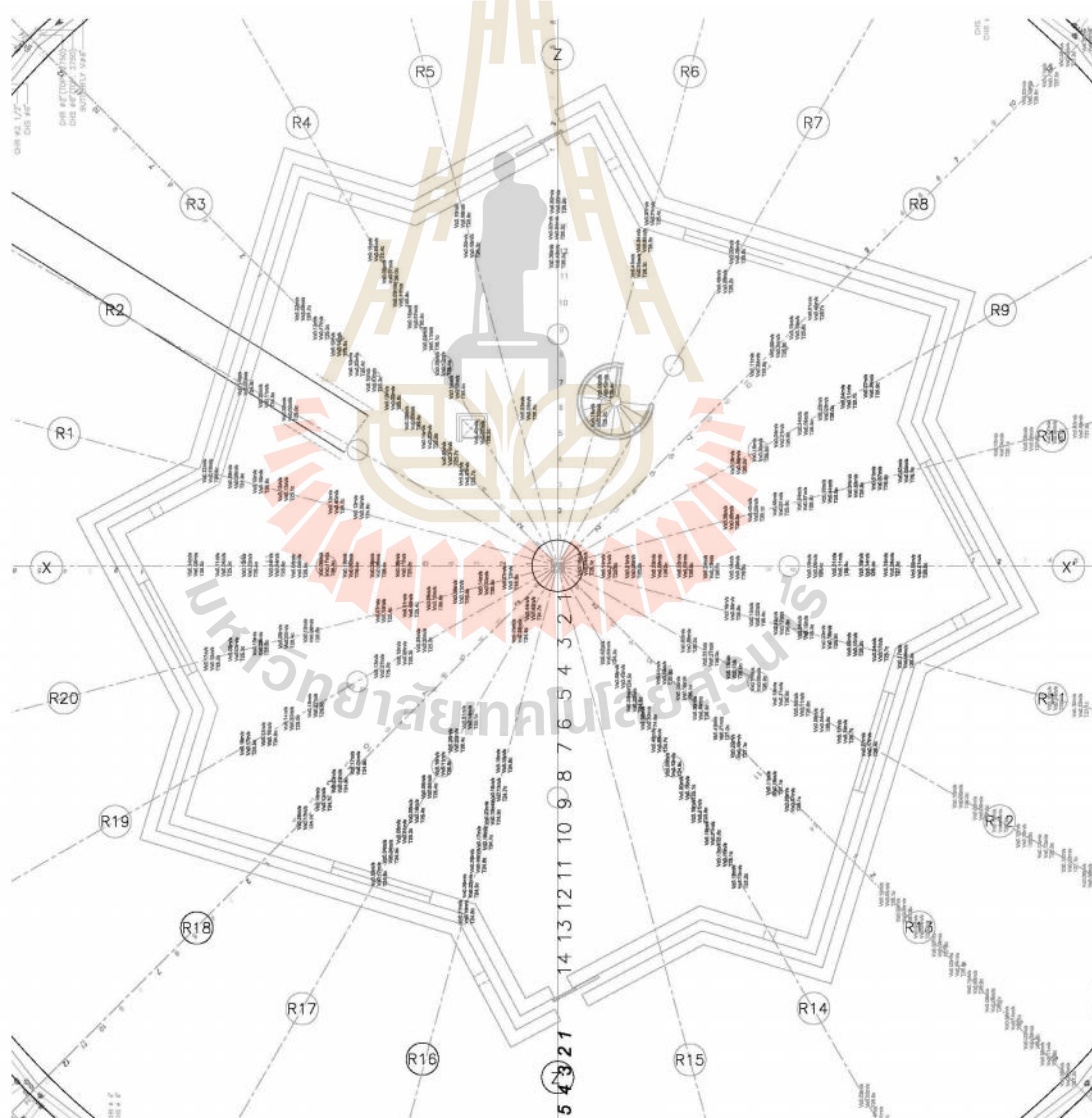
รูปที่ 5.11 ตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศ FCU-C และ AHU-C

1.4) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศของช่องทางออกอากาศ ทั้ง 8 จุดโดยรอบอาคารดังนี้ Control room, Corridor 1st floor, Corridor 2nd floor, Machine room, Extend-Area Exhaust 3 จุด และ Main Exhaust (EFS2EX) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิและความเร็วอากาศแสดงตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่วัดจากอุปกรณ์ระบบปรับอากาศเพื่อใช้เป็น
เงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

อุปกรณ์		ความเร็วอากาศ (m/s)	อุณหภูมิ (K)	อุณหภูมิ (C)
ACLS	Supply air	5	295.7	22.7
ACLS	Return air	3.3	297.4	24.4
AHU#5	Fresh air	3.6	297.8	24.8
AHU#5	Return air	3.1	297.8	24.8
AHU#5	Supply air1	6.1	293	20
AHU#5	Supply air2	5.45	293.1	20.1
AHU#5	Supply air3	7	293.3	20.3
AHU#5	Supply air4	4.8	293	20
AHU#5	Supply air5	6.5	293.2	20.2
AHU#5	Supply air6	7.8	293.5	20.5
AHU#6	Fresh air	3.48	297.7	24.7
AHU#6	Return air	3.4	297.3	24.3
AHU#6	Supply air1	5.5	292.7	19.7
AHU#6	Supply air2	4.6	292.7	19.7
AHU#6	Supply air3	3.8	292.7	19.7
AHU#6	Supply air4	4.9	292.7	19.7
AHU#6	Supply air5	5.7	292.6	19.6
AHU#6	Supply air6	6.2	292.7	19.7
AHU#6	Supply air7	3.4	292.7	19.7
AHU#6	Supply air8	3	292.6	19.6
AHU#7	Fresh air	3.56	297.8	24.8
AHU#7	Return air	3.2	297.2	24.2
AHU#7	Supply air1	7.1	291.5	18.5
AHU#7	Supply air2	5.8	291.3	18.3
AHU#7	Supply air3	5.9	291.3	18.3
AHU#7	Supply air4	5.7	291.1	18.1
AHU#7	Supply air5	5.9	291.9	18.9
AHU#7	Supply air6	6.7	292.6	19.6
AHU#8	Fresh air	3.5	297.8	24.8
AHU#8	Return air	3.35	297	24
AHU#8	Supply air1	5.15	291.7	18.7
AHU#8	Supply air2	4.8	291.8	18.8
AHU#8	Supply air3	5.5	291.6	18.6
AHU#8	Supply air4	8.1	291.5	18.5
AHU#8	Supply air5	4.5	290.7	17.7
AHU-C	Return air	2	297.32	24.32
AHU-C	Supply air	4	294.72	21.72
FCU-C	Return air	0.2	297.32	24.32
FCU-C	Supply air	2	294.72	21.72
Control room	Exhaust air	3.3	298.5	25.5
Cooridor1st	Exhaust air	2.03	298.4	25.4
Cooridor2nd	Exhaust air	2.03	298.4	25.4
Efs2Ex	Exhaust air	3.48	299.2	26.2
Extend Area	Exhaust air	1.68	298.5	25.5
Machine room	Return air	6.34	299.1	26.1

2.) การเก็บวัดข้อมูลในพื้นที่ที่สนใจ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องจากผลที่ได้ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการตรวจวัดข้อมูล คือ พื้นที่ภายในกำแพงกันรังสีซึ่งเป็นที่อยู่ของ อุปกรณ์วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน โดยทำการตรวจวัดข้อมูลที่ระดับความสูงจากพื้น 1.2 เมตร (ตำแหน่งความสูงโคจรของลำอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นระดับความสูงของอุปกรณ์เครื่องเร่งอนุภาคและ อุปกรณ์ระบบลำเลียงแสง) แบ่งจุดวัดเป็นแนวแกนทำมุม 15 องศาเท่ากันเป็นวงรอบ ทำการวัดใน 2 ทิศทาง คือ ทิศทาง X และ Z แบ่งตำแหน่งการวัดออกจากกึ่งกลางอาคารตามแนวรัศมีเป็นช่วงๆ ระยะห่างกัน 1 เมตรทั้งหมด 14 จุด ช่วงเวลาการวัด 19:00 – 21:00 น. และทำการวัดซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง ระหว่างวันที่ 15 – 30 มิถุนายน 58 ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการวัดดังรูปที่ 5.12 และตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.12 ตำแหน่งการตรวจวัดอนุกรมและความเร็วอากาศภายในอาคาร

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ตรวจวัดบริเวณพื้นที่วงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

ความเร็ว(m/s), อุณหภูมิ(°C)		ตำแหน่ง													
แกน		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
X	Vx	-	-	-	-	-	0.11	0.0767	0.0533	0.1667	0.0533	0.0433	0.22	0.0433	0.0533
	Vz	-	-	-	-	-	0.36	0.3567	0.1567	0.08	0.0533	0.0367	0.15	0.1133	0.1433
	I	-	-	-	-	-	25.2	25.4	25.5	25.5	25.5	25.6	25.8	25.4	25.5
R1	Vx	-	-	-	-	-	-	-	0.35	0.5	-	0.13	0.19	0.09	0.1
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	0.12	0.12	-	0.12	0.12	0.28	0.22
	I	-	-	-	-	-	-	-	24.6	24.7	-	25.1	24.9	24.9	24.6
R2	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.11	0.03
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32	0.20	0.14
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.9	24.4	24.5
R3	Vx	-	-	-	-	0.07	0.31	0.07	0.20	0.22	0.07	0.32	0.14	0.17	0.38
	Vz	-	-	-	-	0.5367	0.5333	0.1367	0.28	0.1333	0.1033	0.1033	0.1	0.1267	0.2167
	I	-	-	-	-	25.6	25.6	25.5	25.6	25.5	25.5	25.6	25.5	25.5	25.5
R4	Vx	-	-	-	-	-	0.0733	n/a	0.1167	0.1167	0.11	0.22	0.11	0.07	0.2267
	Vz	-	-	-	-	-	0.4033	n/a	0.1367	0.0833	0.08	0.16	0.0333	0.05	0.1533
	I	-	-	-	-	-	25.7	n/a	26.3	25.2	25.4	25.7	25.9	25.4	25.4
R5	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1267	0.0633
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.1033
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.9	26
Z'	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.43	0.54	0.2
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.38	0.32	0.32
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.3	26.5	26.5
R6	Vx	-	-	-	-	-	0.33	0.17	-	-	-	-	0.38	0.22	0.21
	Vz	-	-	-	-	-	0.1633	0.06	-	-	-	-	0.45	0.34	0.37
	I	-	-	-	-	-	26.1	26.1	-	-	-	-	26.4	26.5	26.1
R7	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	0.28
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.48	0.2
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.3	26.3
R8	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24	0.24	0.19	0.4
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1067	0.0533	0.15	0.0133
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.7	25.7	25.7	25.7
R9	Vx	-	-	-	-	-	-	-	0.59	0.33	0.21	0.08	0.28	0.11	0.07
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.15	0.4	0.34	0.23	0.4	0.27
	I	-	-	-	-	-	-	-	26	26.2	25.8	26	25.9	25.8	25.7
R10	Vx	-	-	-	-	-	-	0.48	0.29	0.31	0.87	0.44	0.53	0.29	0.65
	Vz	-	-	-	-	-	-	0.36	0.4	0.45	0.54	0.36	0.34	0.51	0.63
	I	-	-	-	-	-	-	26.1	26.1	26.1	25.8	26	25.8	26	26.2
X'	Vx	0.0433	0.1067	0.0633	0.0767	0.02	0.13	0.09	-	-	0.0567	0.1133	0.1433	0.05	0.07
	Vz	0.16	0.14	0.2133	0.23	0.2467	0.24	0.1367	-	-	0.1933	0.31	0.19	0.1467	0.05
	I	25.9	26.3	26	26.5	26	26.2	26	-	-	27	26.2	26.5	26.3	26.5
R11	Vx	-	-	-	-	-	-	0.3933	0.22	0.1733	0.1533	0.1767	0.1	0.1667	0.0767
	Vz	-	-	-	-	-	-	0.1933	0.1533	0.25	0.04	0.03	0.0933	0.0433	0.1733
	I	-	-	-	-	-	-	25.7	26	25.9	25.1	26.4	25.6	25.3	25.5
R12	Vx	-	-	-	-	-	0.2633	0.2667	0.1767	0.0833	0.1067	0.0633	0.04	0.1533	0.1733
	Vz	-	-	-	-	-	0.52	0.5067	0.15	0.1133	0.16	0.0833	0.0633	0.12	0.07
	I	-	-	-	-	-	25.8	25.7	26.2	26.6	26.1	26.4	26.4	26.1	26
R13	Vx	-	-	-	-	-	0.13	0.1033	0.1367	0.2133	0.18	-	0.16	0.0667	n/a
	Vz	-	-	-	-	-	0.44	0.4533	0.3	0.4333	0.2533	-	0.1133	0.03	n/a
	I	-	-	-	-	-	26.2	26.1	26.5	26.9	27.2	-	26.8	25.6	n/a
R14	Vx	-	-	-	0.3267	0.42	0.2167	0.3	0.2567	0.13	0.1833	0.2067	0.2133	0.1	0.13
	Vz	-	-	-	0.4167	0.58	0.3567	0.36	0.42	0.0933	0.2	0.1567	0.1933	0.1333	0.1633
	I	-	-	-	24.1	24.5	24.5	24.6	24.6	24.9	25.3	25.2	25.4	25.7	25.1
R15	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z'	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R16	Vx	-	-	-	-	-	-	-	0.1767	0.13	0.1467	0.1567	0.15	0.23	0.1567
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	0.1533	0.1633	0.23	0.1667	0.2467	0.2467	0.21
	I	-	-	-	-	-	-	-	24.6	24.6	24.6	24.6	24.7	24.5	24.4
R17	Vx	-	0.4233	0.2933	-	-	-	0.1433	0.2833	-	0.0833	0.16	0.0133	0.0367	0.1733
	Vz	-	0.4433	0.23	-	-	-	0.21	0.26	-	0.0633	0.0633	0.0767	0.0767	0.0333
	I	-	24.7	24.8	-	-	-	25.2	25.2	-	25.5	25	25	25	24.6
R18	Vx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0433	0.1567	0.1267	0.1167
	Vz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1667	0.2267	0.18	0.08
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.8	24.7	24.6	24.7
R19	Vx	-	-	-	-	-	0.2967	0.2533	0.2733	-	-	0.2667	0.2033	0.1567	0.1733
	Vz	-	-	-	-	-	0.2767	0.1467	0.1333	-	-	0.1767	0.1433	0.1233	0.19
	I	-	-	-	-	-	25.5	25.3	25.2	-	-	25.1	25.2	24.7	24.6
R20	Vx	-	0.1233	0.0267	0.11	0.1033	0.09	0.18	-	-	0.0567	0.2167	0.2833	0.0333	0.15
	Vz	-	0.0667	0.1367	0.0767	0.0833	0.31	0.0667	-	-	0.13	0.0867	0.11	0.0467	0.17
	I	-	25.7	25.7	25.7	25.7	25.4	25.7	-	-	25.4	25.5	25.6	26.2	25.1

เครื่องมือที่ใช้ทำการวัด ยี่ห้อ TESTO รุ่น 435 แบบหัววัดเป็นประเภท Hot wire (รูปที่ 5.13) ช่วงการวัดอุณหภูมิคือ -20 ถึง +70 องศาเซลเซียส (ความแม่นยำ ± 0.3 องศาเซลเซียส) และช่วงการวัดความเร็วคือ 0 ถึง 20 เมตร/วินาที (ความแม่นยำ ± 0.03 เมตร/วินาที)



รูปที่ 5.13 เครื่องมือวัดแบบลวดความร้อน

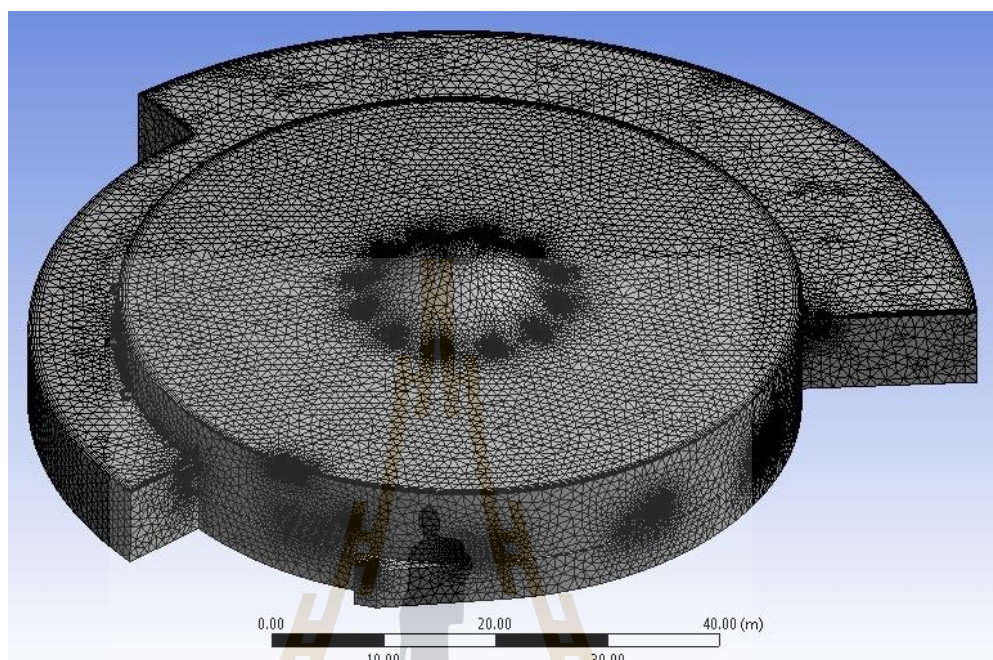
5.3 การจำลองการไหลอากาศภายในอาคารของวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

การจำลองพฤติกรรมกรไหลเวียนอากาศใช้วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT V.14 ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขบนพื้นฐานระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม การจำลองทาง CFD ใช้รูปแบบการไหลปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงรูปแบบที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรไหลได้ใกล้เคียงกับผลการวัดจากแบบจำลองในบทที่ผ่านมา นำค่าการตรวจวัดความเร็วลมและอุณหภูมิที่ช่องทางเข้าออกอากาศ(ตารางที่ 5.1) ป้อนในโปรแกรมจำลองผลทางคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นเงื่อนไขขอบเขต และที่ผนังอาคารของแบบจำลองซึ่งทำจากคอนกรีตหนา 15 เซนติเมตรกำหนดให้มีเงื่อนไขเป็นแบบจนวน(Isothermal) อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 27 องศาเซลเซียส หลังคาด้านบนทำจากโลหะแผ่นบาง(Metal Sheet) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c)บนหลังคา คือ $22 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ คำนวณจาก $h_c = 10.45 - v + 10v^{1/2}$ (ที่มา www.TheEngineeringToolbox.com) เมื่อ $v = 2 \text{ m/s}$ จากแผนที่ศักยภาพลมของประเทศไทย บริเวณจังหวัดนครราชสีมาเฉลี่ยทั้งปี กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

1.) การสร้างกริด

การจำลองคอมพิวเตอร์ใช้กริดแบบ Tetrahedral ที่มีความละเอียดประมาณ 4,300,000 อิเลเมนต์ รูปที่ 5.14 แสดงลักษณะกริดที่ใช้ จะเห็นได้ว่ากริดถูกสร้างอย่างหนาแน่นบริเวณ ช่อง

ทางเข้าออกอากาศต่างๆเนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรไหล

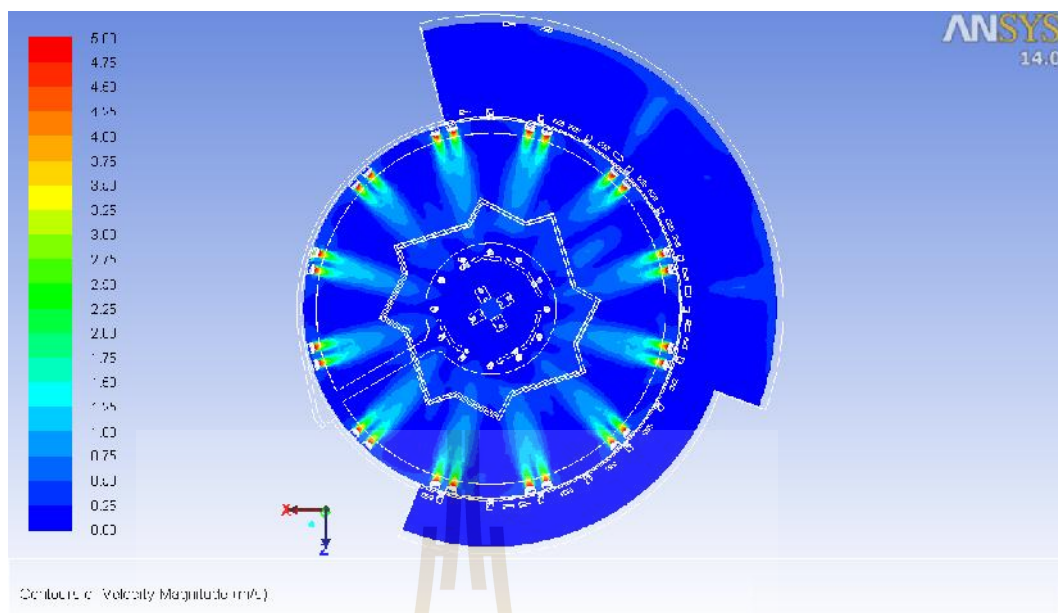


รูปที่ 5.14 แสดงกริด Tetrahedral ของแบบจำลอง

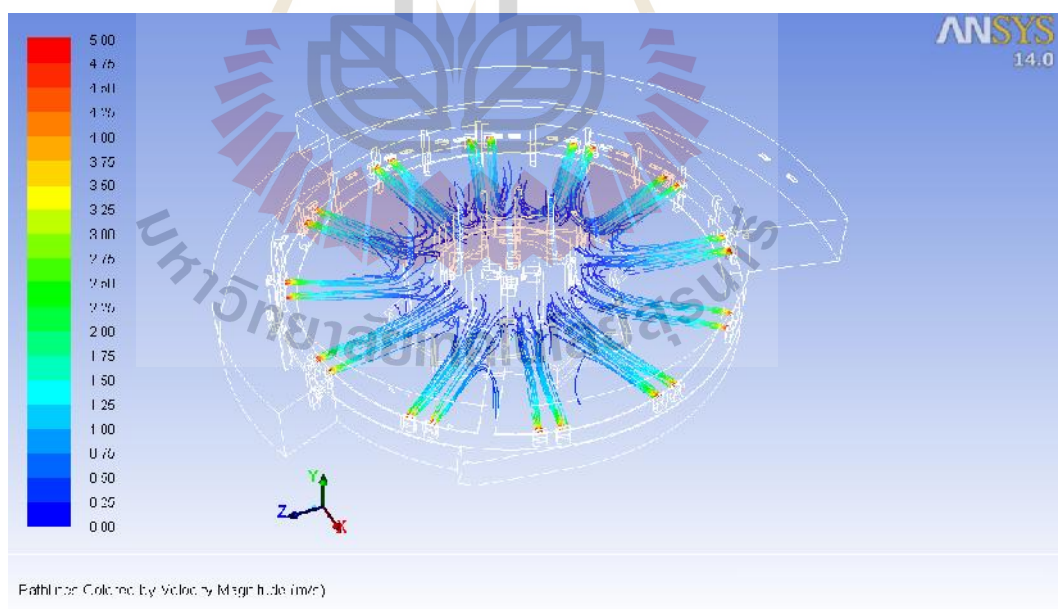
2.) การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองผลเบื้องต้นเพื่อให้เห็นพฤติกรรมกรไหลของอากาศ และการกระจายอุณหภูมิภายในอาคารที่สภาวะปัจจุบัน และเปรียบเทียบผลกับการตรวจวัดค่าเพื่อพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงและออกแบบกรไหลเวียนอากาศภายในอาคารใหม่

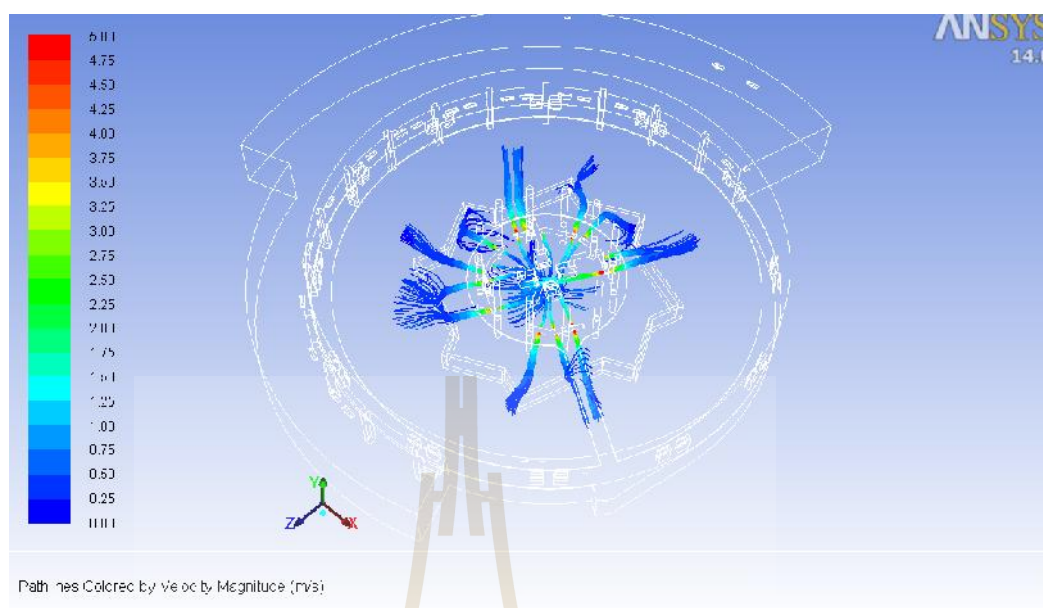
ผลการจำลองที่ระดับหน้าต่างช่องทางออกอากาศของ FCU ซึ่งสูงจากระดับพื้นอาคาร 6 เมตร ผลที่ได้พบว่า แม้ FCU จะถูกวางที่ตำแหน่งโดยรอบอาคารทรงกระบอกแต่ก็สามารถส่งแรงลมไปจนถึงตำแหน่งของวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ที่กลางอาคารได้ ดังสังเกตจากคอนทัวร์ความเร็วอากาศที่ระนาบความสูงนี้(รูปที่5.15) ก่อนจะถูกกระแสมลจากช่องออกอากาศของ AHU ที่พุ่งออกจากกำแพงกันรังสีผลักดันให้ยกตัวสูงขึ้น(รูปที่5.16) แสดงให้เห็นว่า แรงลมจาก AHU ไม่เพียงมีผลต่อพฤติกรรมกรไหลของอากาศภายในพื้นที่กำแพงกันรังสี แต่ยังสามารถส่งผลกระทบต่ออากาศบริเวณรอบนอกด้วยดังรูปที่5.17



รูปที่ 5.15 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 6 เมตรจากพื้นอาคาร

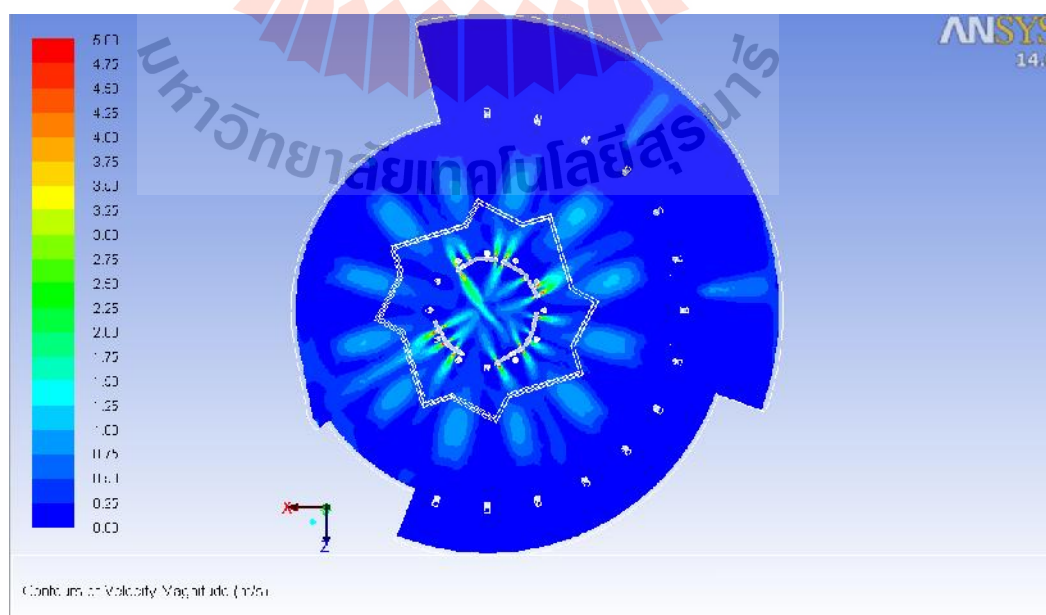


รูปที่ 5.16 เส้นความเร็วการไหลของอากาศจากช่องออกอากาศของ FCU



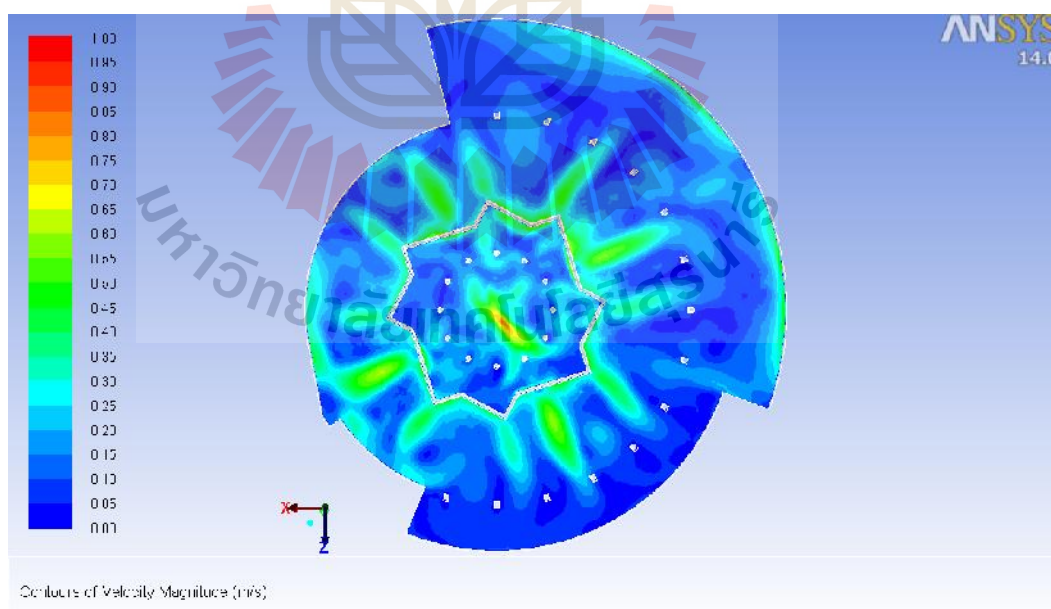
รูปที่ 5.17 เส้นความเร็วการไหลของอากาศจากช่องออกอากาศของ AHU

เมื่อดูที่ระนาบความสูง 3.6 เมตรซึ่งตรงกับช่องทางออกอากาศของ AHU พบว่าแรงลมบางส่วนที่ออกมาสามารถส่งความเร็วออกนอกกำแพงกันรังสีไปสู่บริเวณโรงทดลองได้ แต่การกระจายตัวของความเร็วไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นผลมาจากตำแหน่งช่องทางออกที่วางตัวไม่สมมาตรกัน(รูปที่ 5.18)

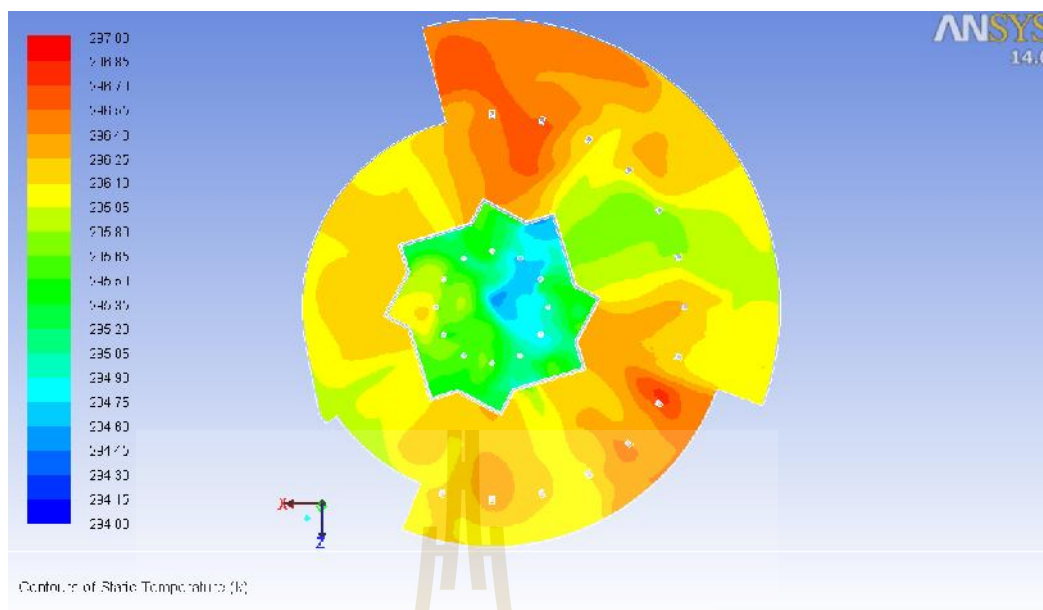


รูปที่ 5.18 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 3.6 เมตรจากพื้นอาคาร

ระนาบความสูง 1.2 เมตรจากระดับพื้นอาคารเป็นระดับความสูงวงโคจรลำอิเล็กตรอนของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งประกอบด้วยท่อสุญญากาศ แม่เหล็กไฟฟ้า และอุปกรณ์ให้พลังงานด้วยคลื่นวิทยุ มีหน้าที่ควบคุมทิศทางและรักษาวงโคจรของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการซึ่งมีความละเอียดสูง อุปกรณ์เหล่านี้ถูกสร้างจากวัสดุที่เป็นโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น สแตนเลส อลูมิเนียม ทองแดง และเหล็กโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าโลหะเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ดังนั้นที่ระนาบความสูงและบริเวณพื้นที่ภายในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่สม่ำเสมอเพื่อไม่ให้โครงสร้างอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไปยังจะส่งผลกระทบต่อควบคุมดังกล่าว จากผลจำลองคอมพิวเตอร์ที่ระนาบนี้ พบว่าภายในกำแพงกันรังสีการกระจายความเร็วไม่สม่ำเสมอ โดยระดับความเร็วอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.8 เมตร/วินาที บริเวณตอนกลางซึ่งเป็นจุดกลับอากาศเข้าสู่ AHU มีความเร็วสูง การกระจายความเร็วขึ้นกับทิศทางและความหนาแน่นของหัวจ่ายอากาศ และบริเวณที่ความเร็วต่ำคือส่วนที่ไม่มีทิศทางตรงกับหัวจ่ายอากาศ(รูปที่ 5.19) และเมื่อดูการกระจายอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เราสนใจพบว่า การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกับความเร็วโดยบริเวณที่มีทิศทางตรงกับช่องทางออกอากาศจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณที่ไม่ได้รับกระแสลมโดยตรง ดังรูปที่ 5.20 อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 21-23 องศาเซลเซียส



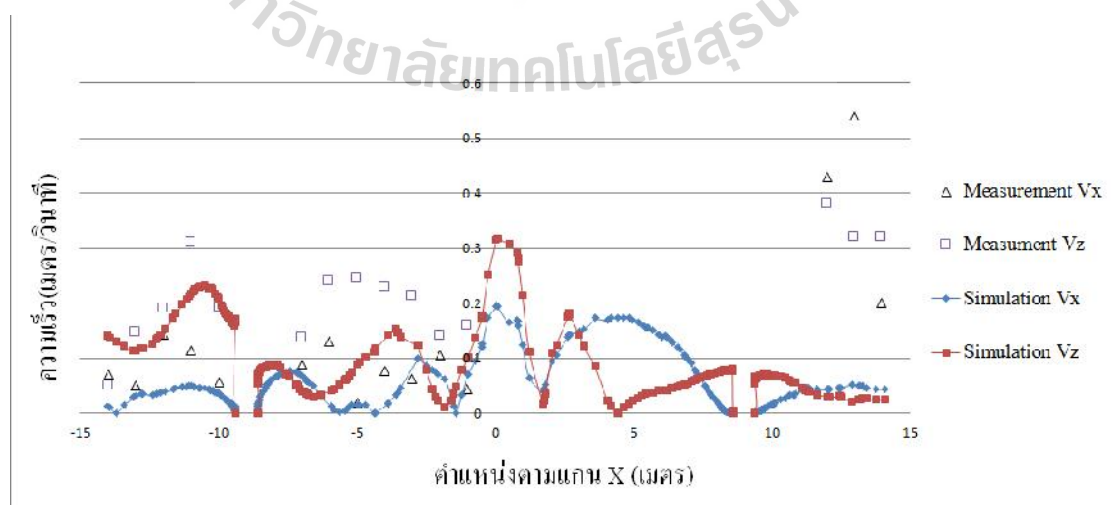
รูปที่ 5.19 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร



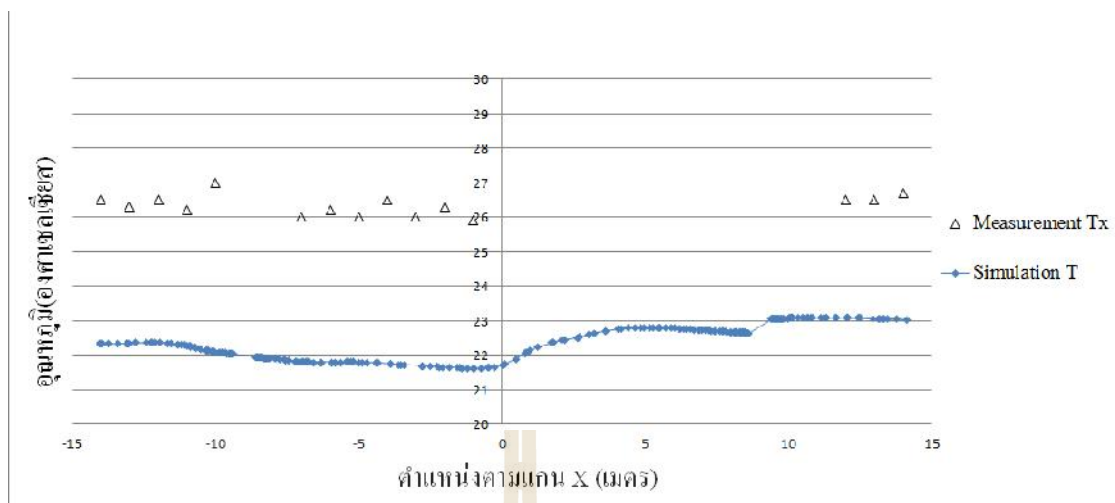
รูปที่ 5.20 คอนทัวร์อุณหภูมิที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร

5.4 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลผลตรวจวัด

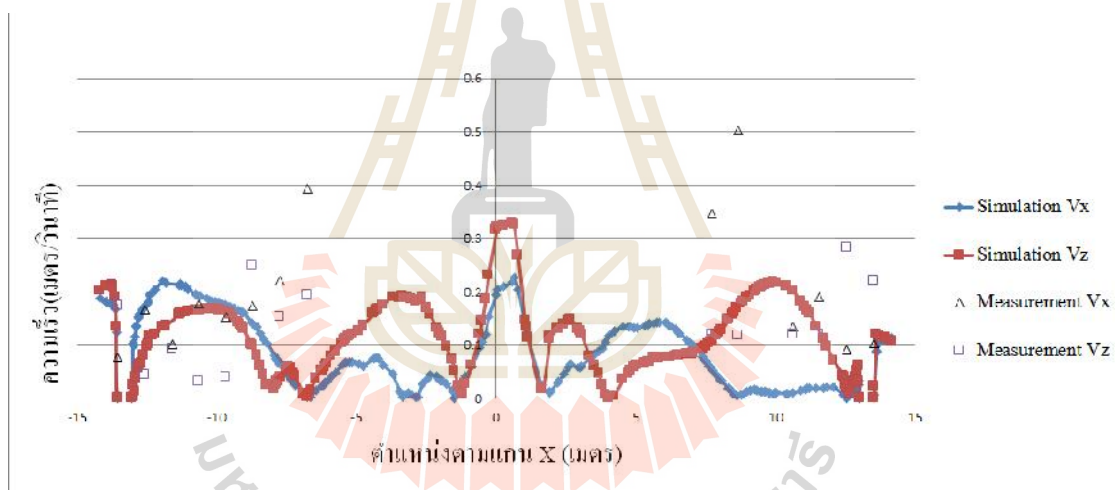
ผลจำลองคอมพิวเตอร์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจากหัวข้อที่ 5.2 โดยแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ชุดข้อมูล คือ 1.)การเปรียบเทียบความเร็วอากาศ และ 2.)การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร บริเวณพื้นที่ภายในกำแพงกันรังสี โดยแบ่งการเปรียบเทียบตามแนวแกนทำมุม 15 องศาเท่ากันตลอดวงรอบตามรูปที่ 5.12 รวมทั้งหมด 12 แนวแกน ซึ่งแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบดังต่อไปนี้ดังแสดงในรูปที่ 5.21 – รูปที่ 5.44



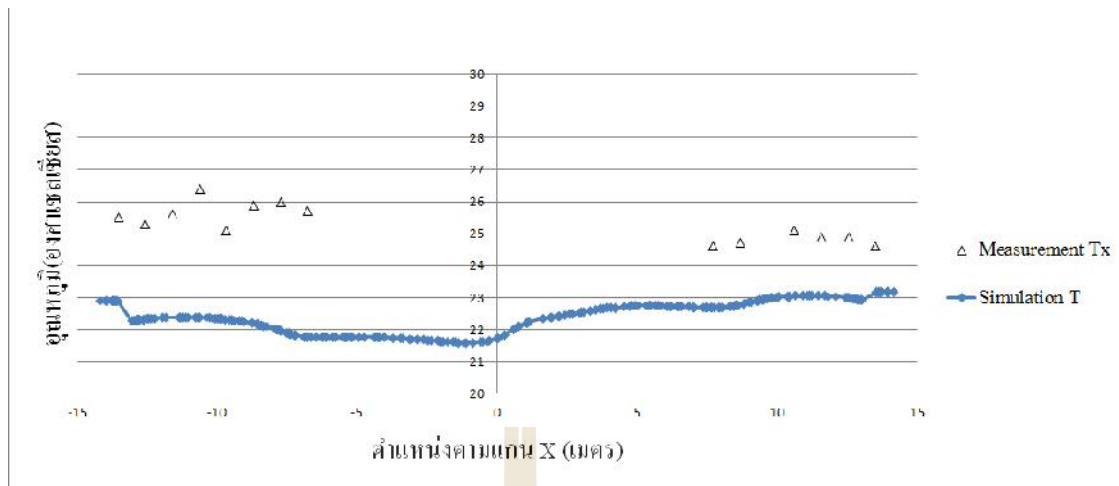
รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน x-x'



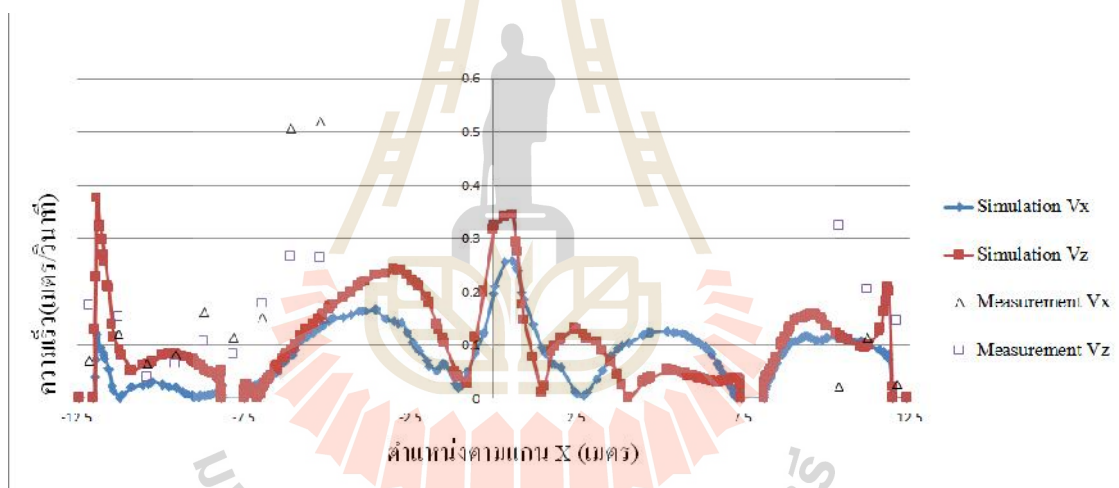
รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน x-x'



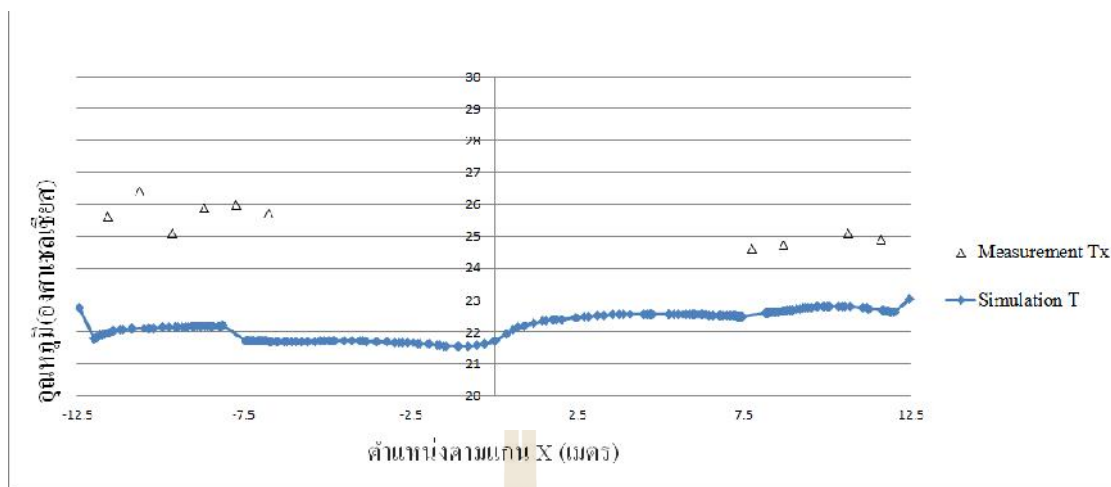
รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R1-R11



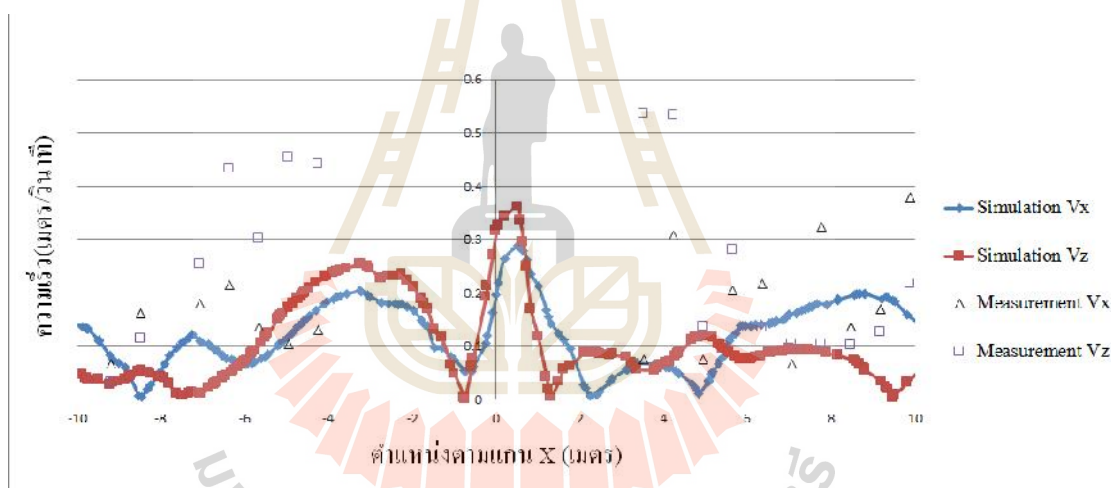
รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R1-R11



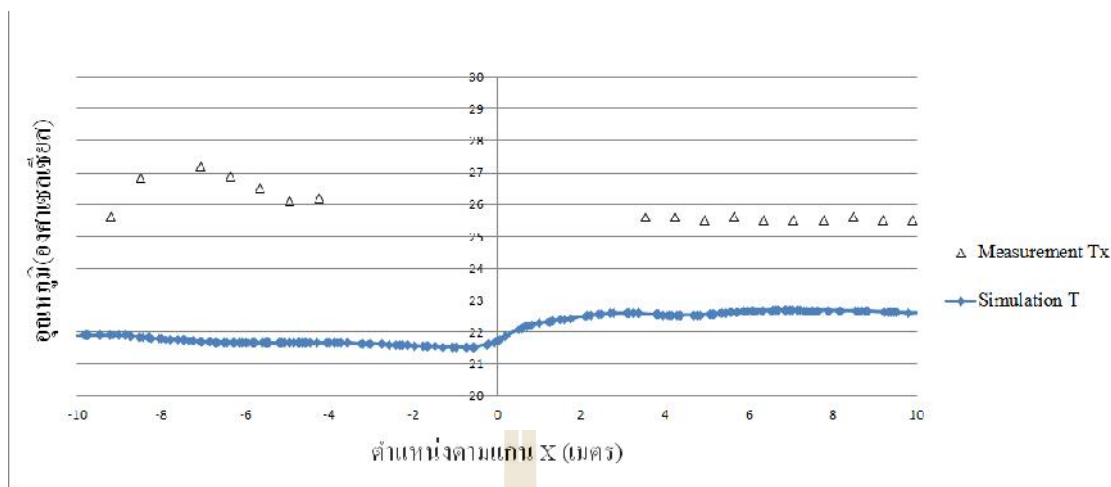
รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R2-R12



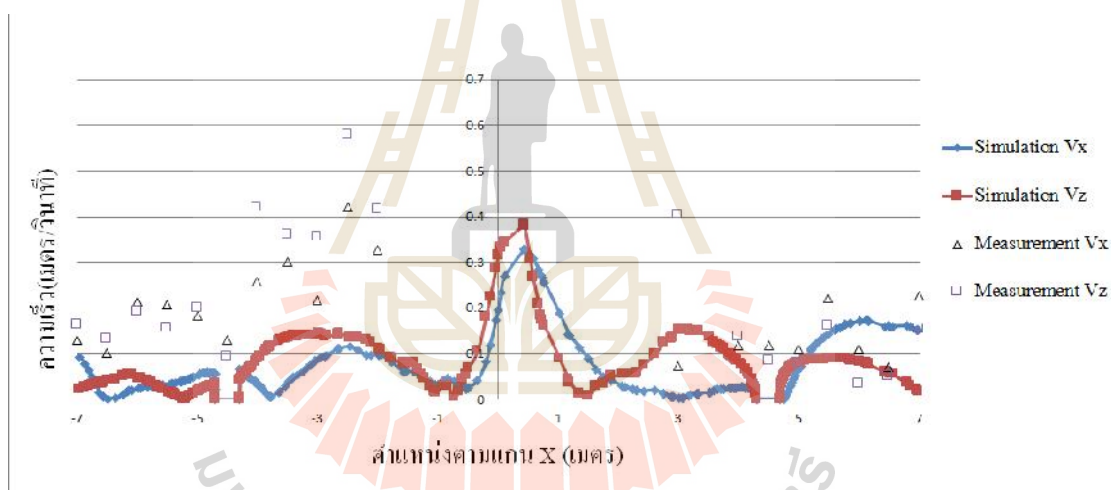
รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R2-R12



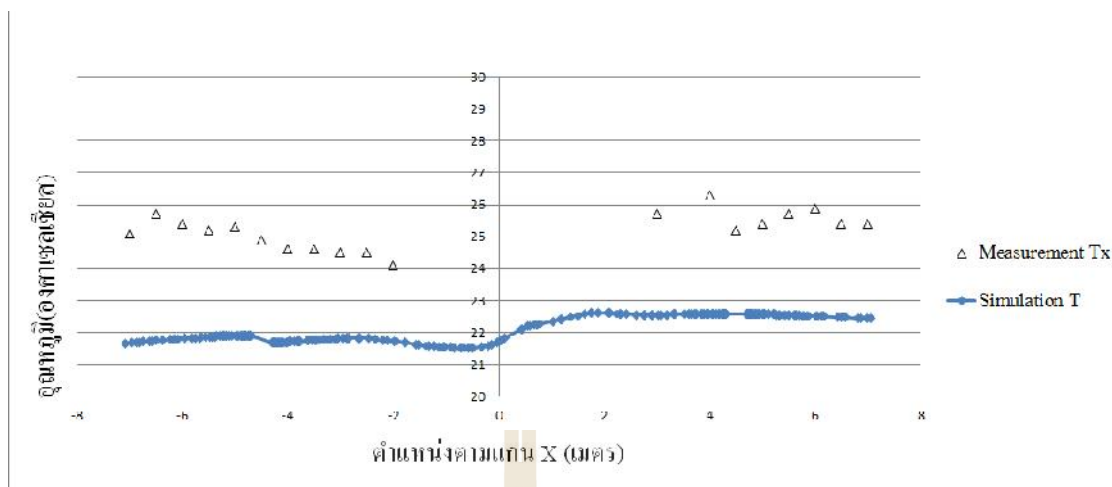
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R3-R13



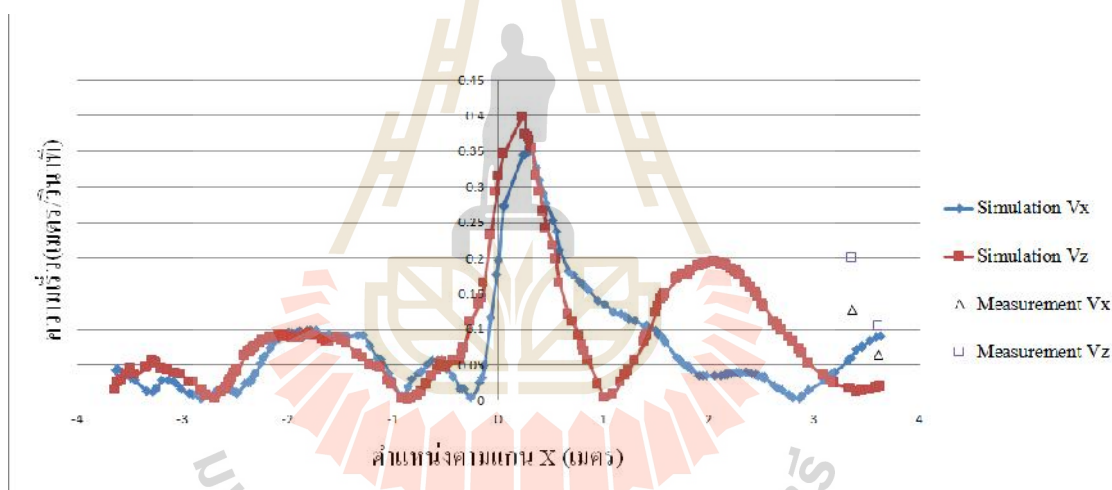
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R3-R13



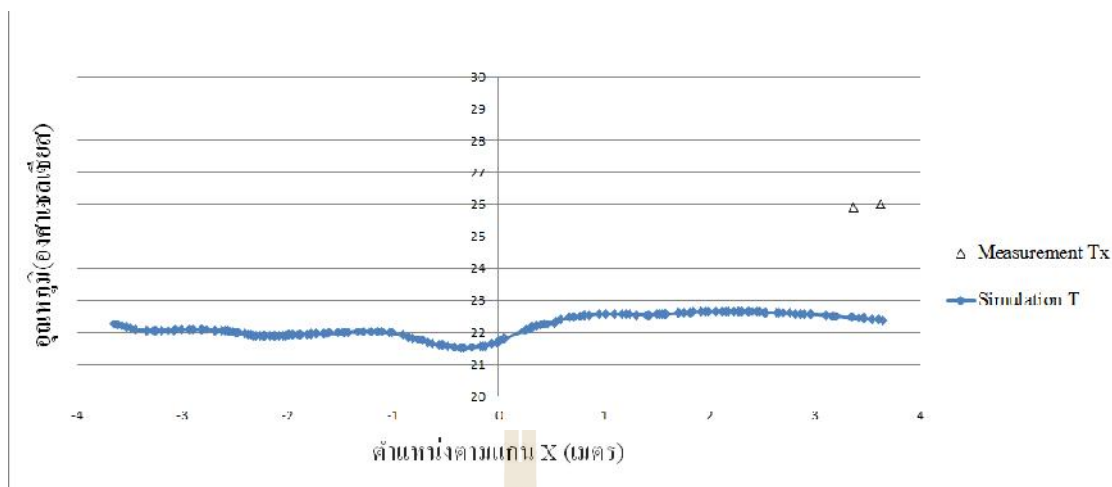
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R4-R14



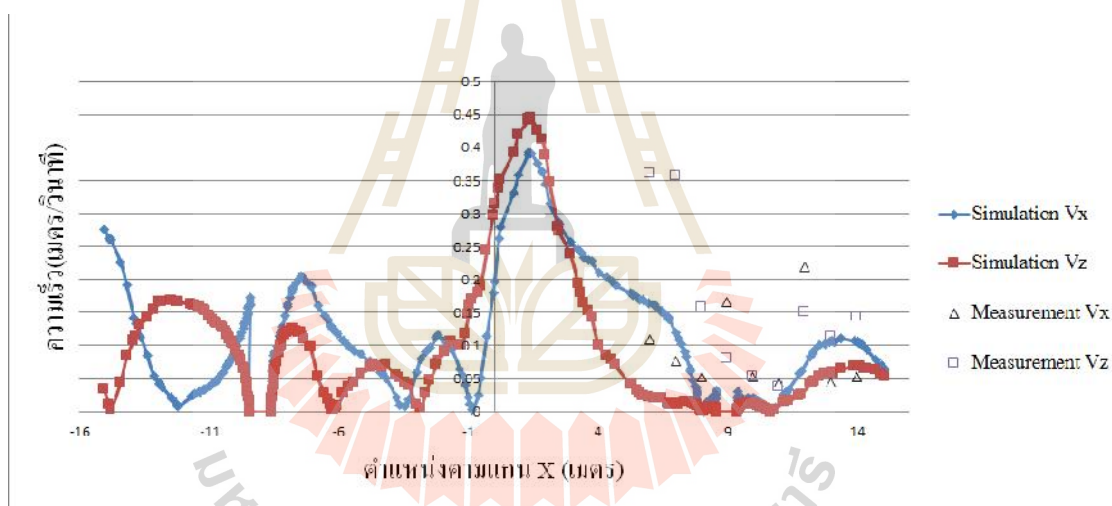
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R4-R14



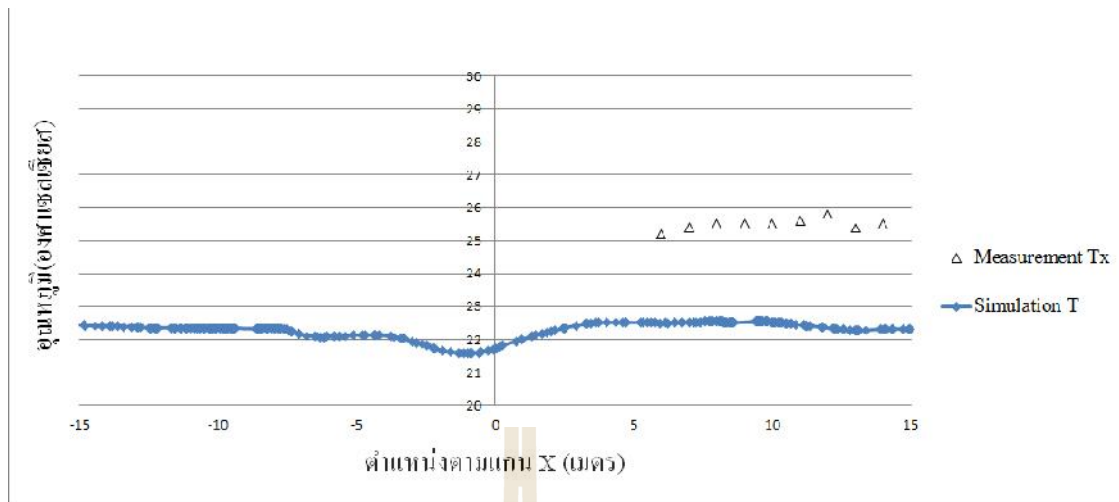
รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R5-R15



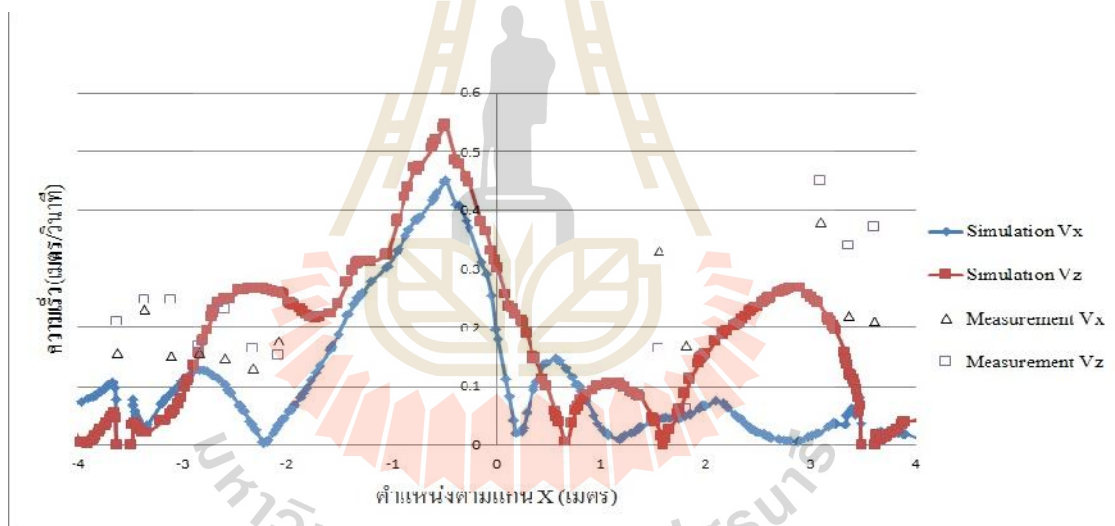
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R5-R15



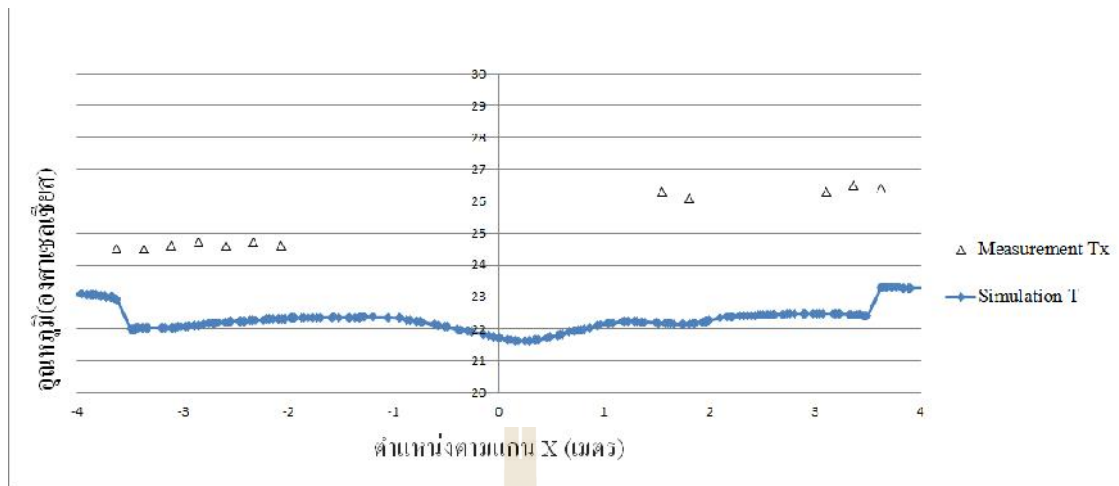
รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน Z-Z'



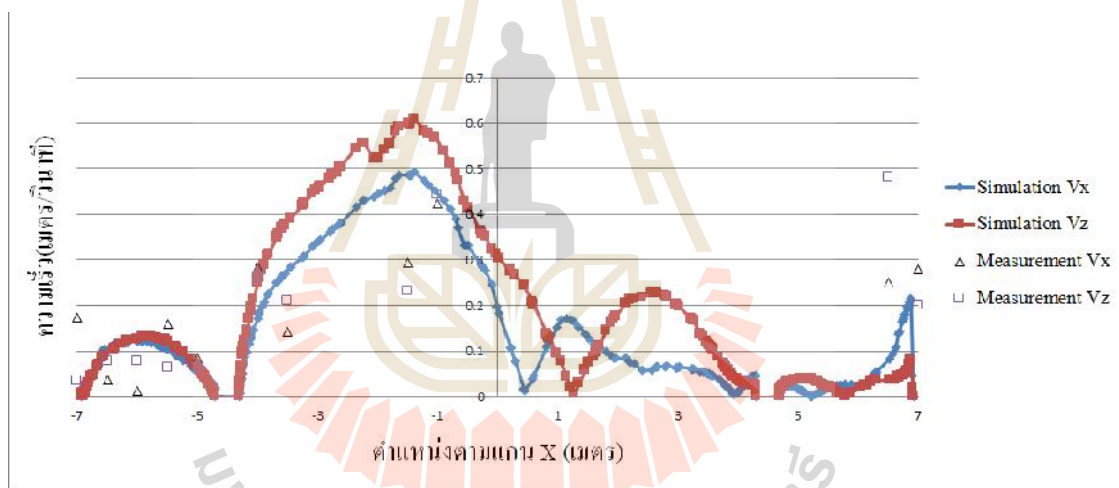
รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน Z-Z'



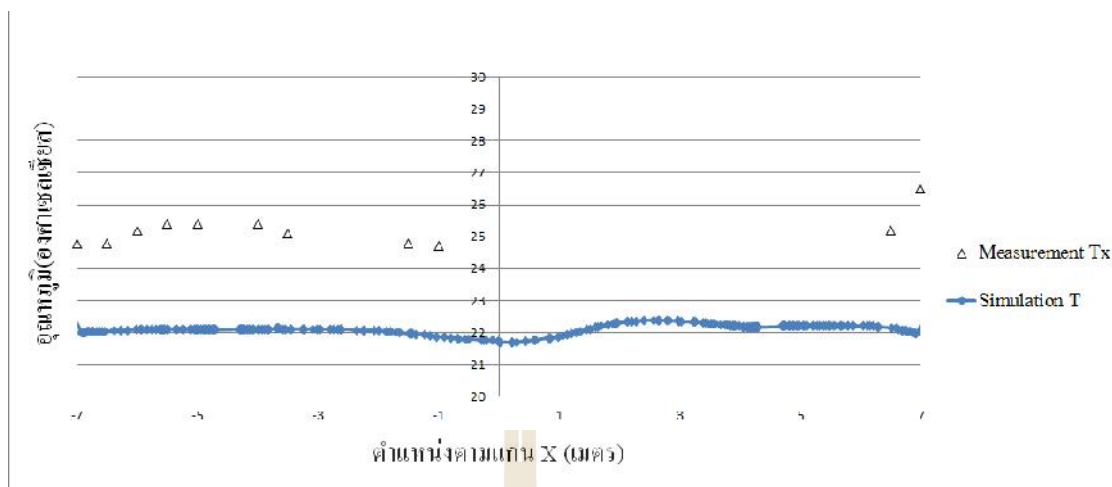
รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R6-R16



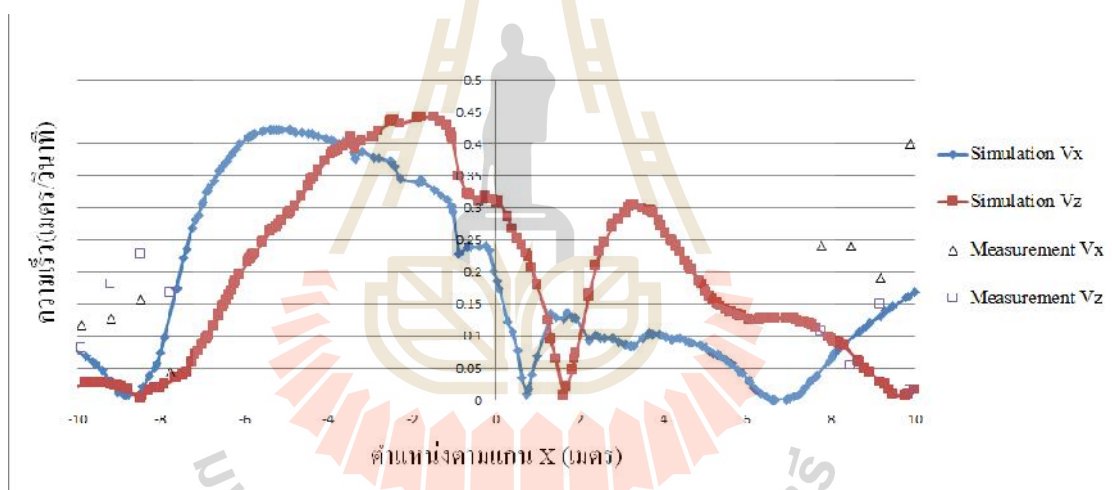
รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R6-R16



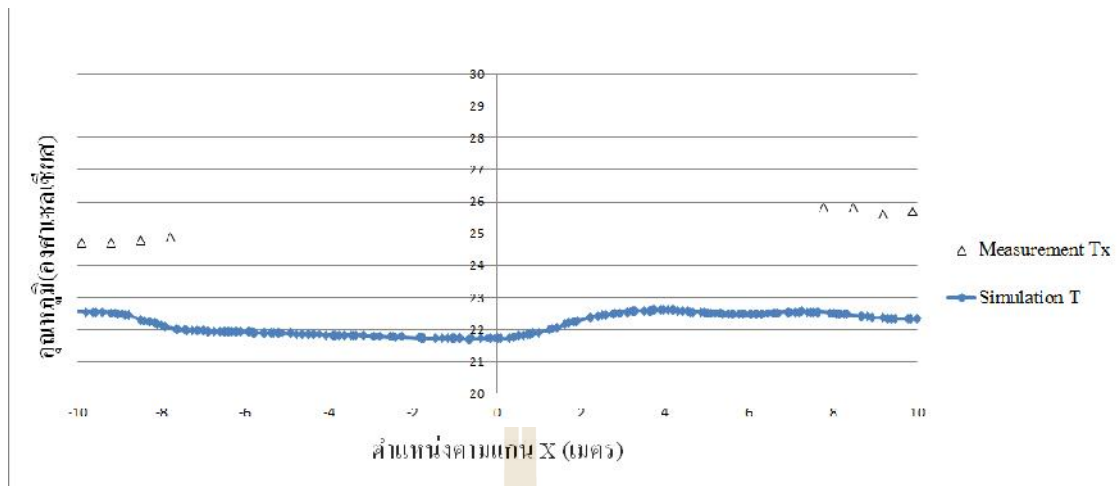
รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R7-R17



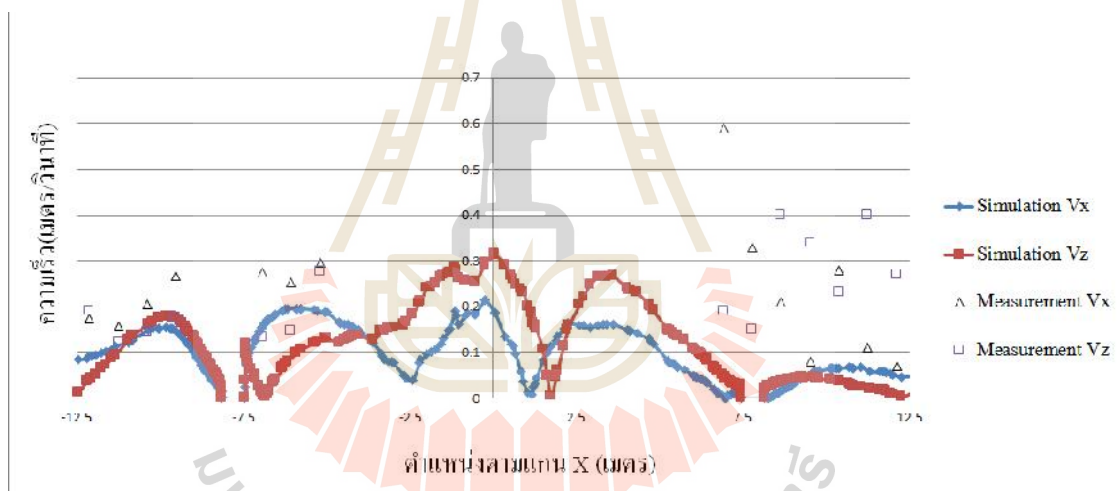
รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R7-R17



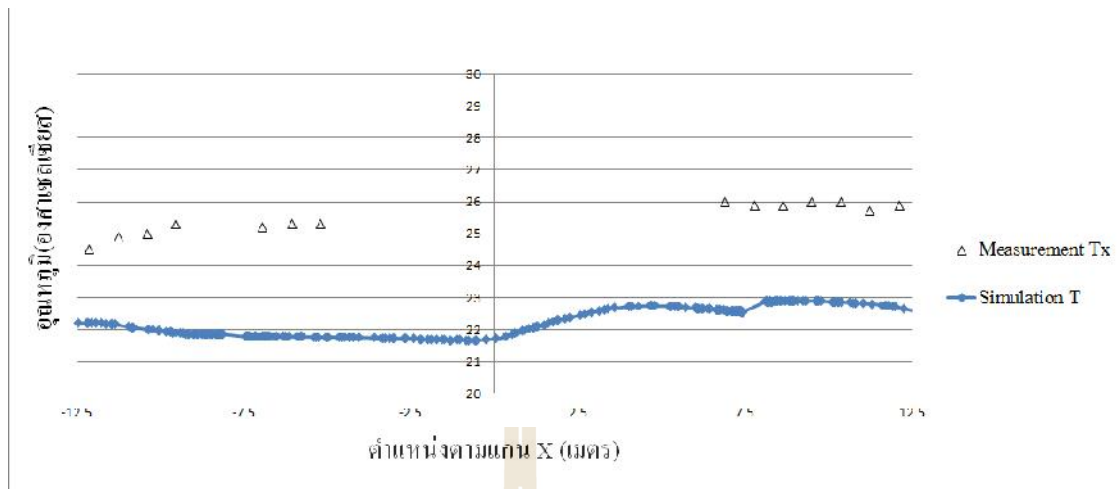
รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R8-R18



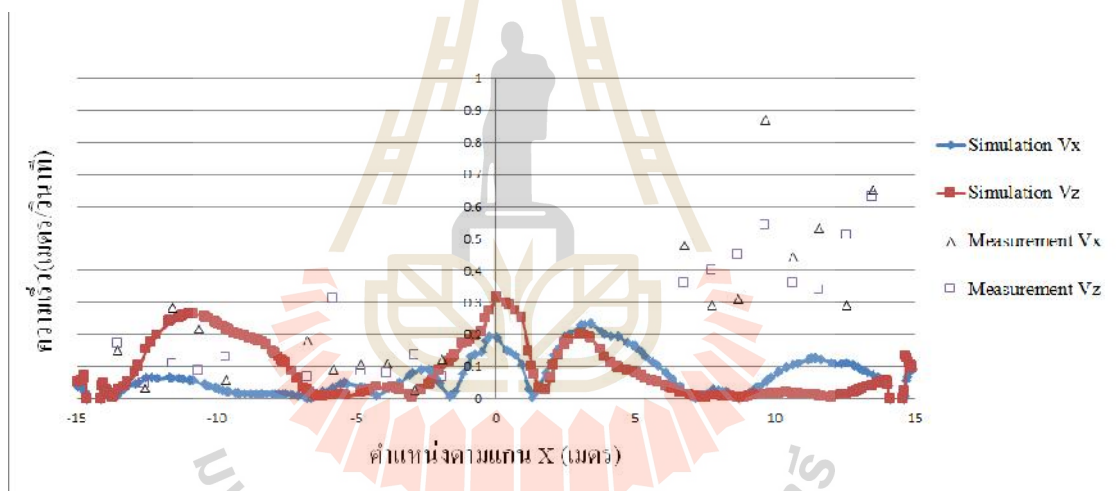
รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R8-R18



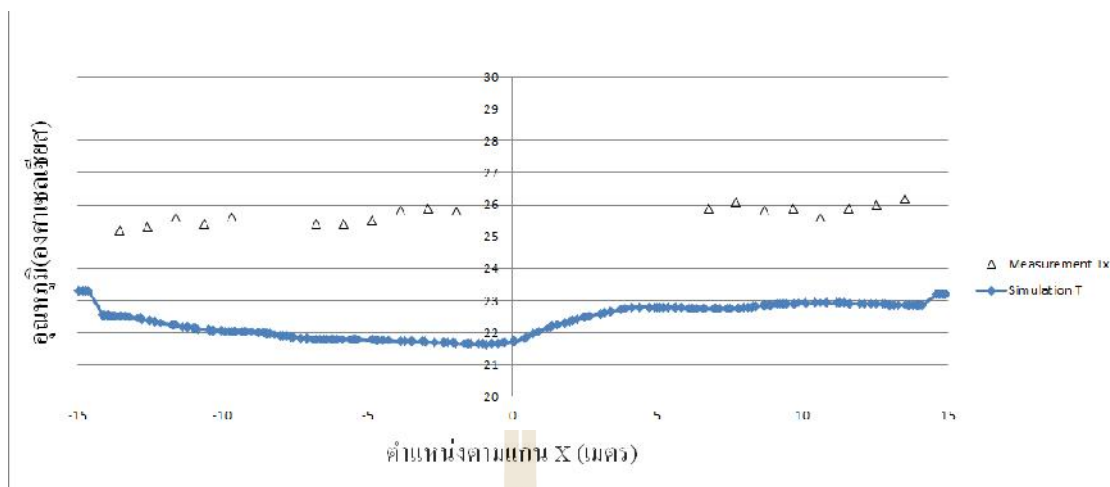
รูปที่ 5.41 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R9-R19



รูปที่ 5.42 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R9-R19

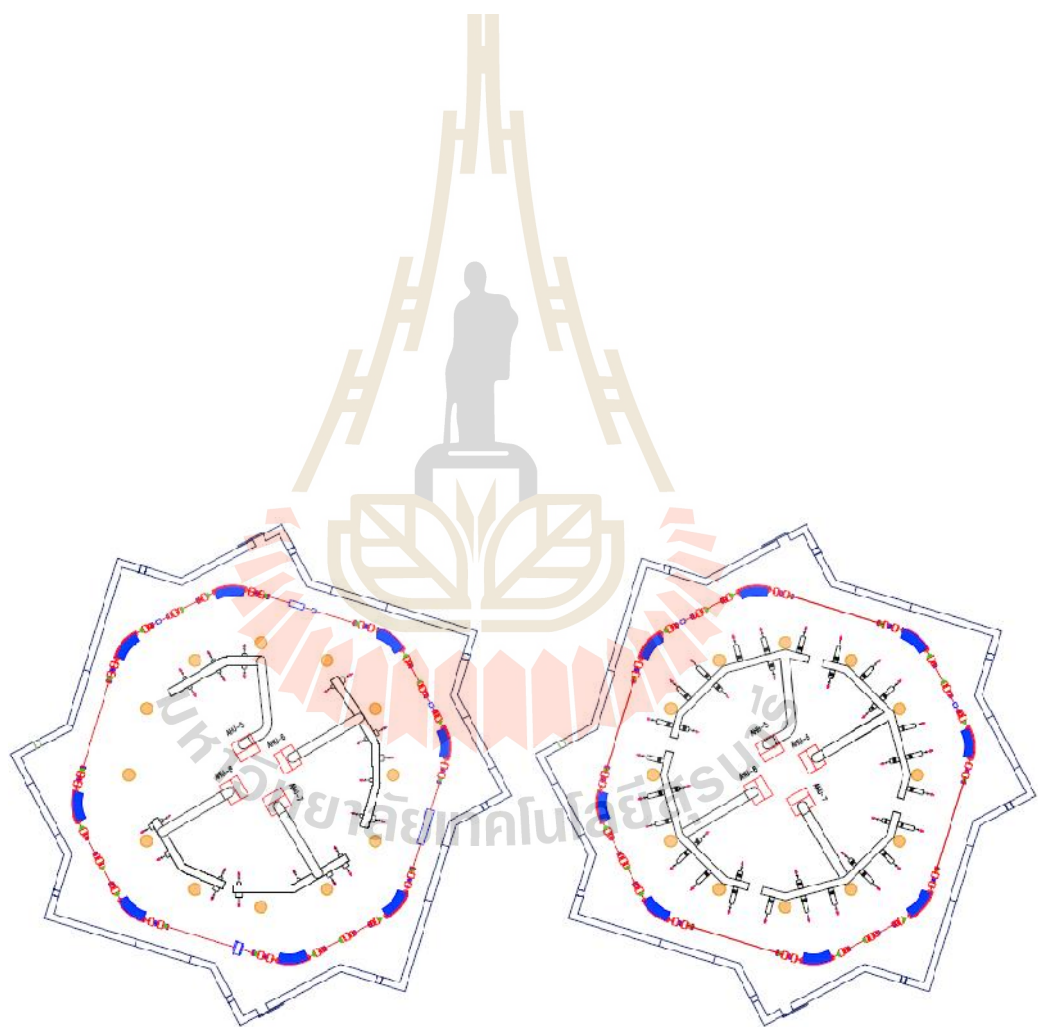


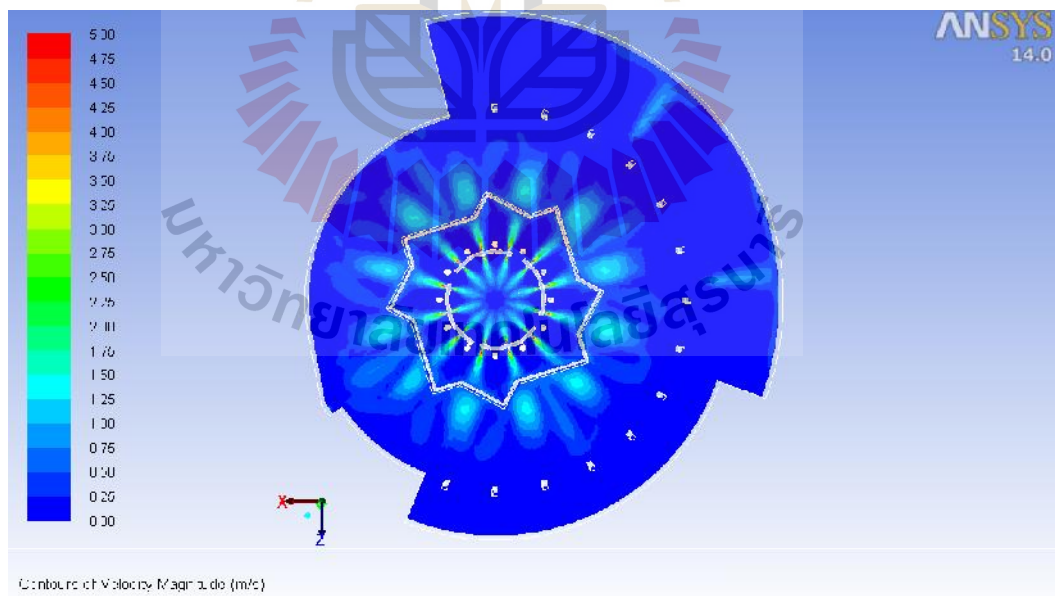
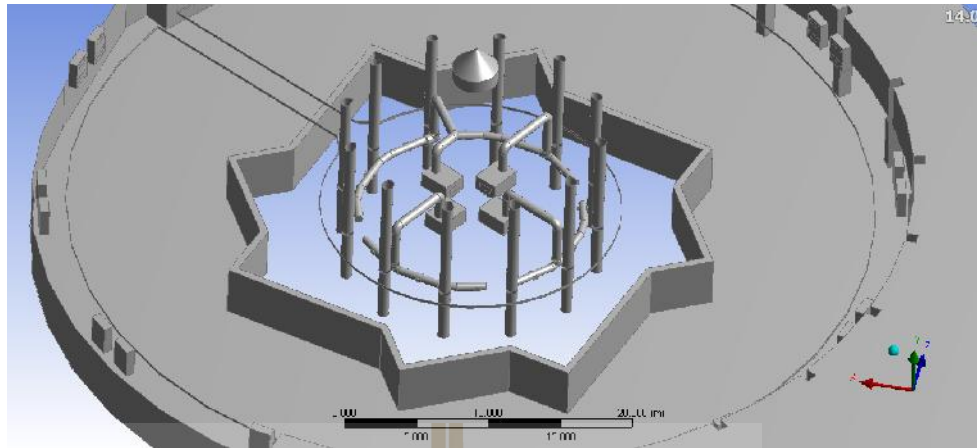
รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบความเร็วอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R10-R20

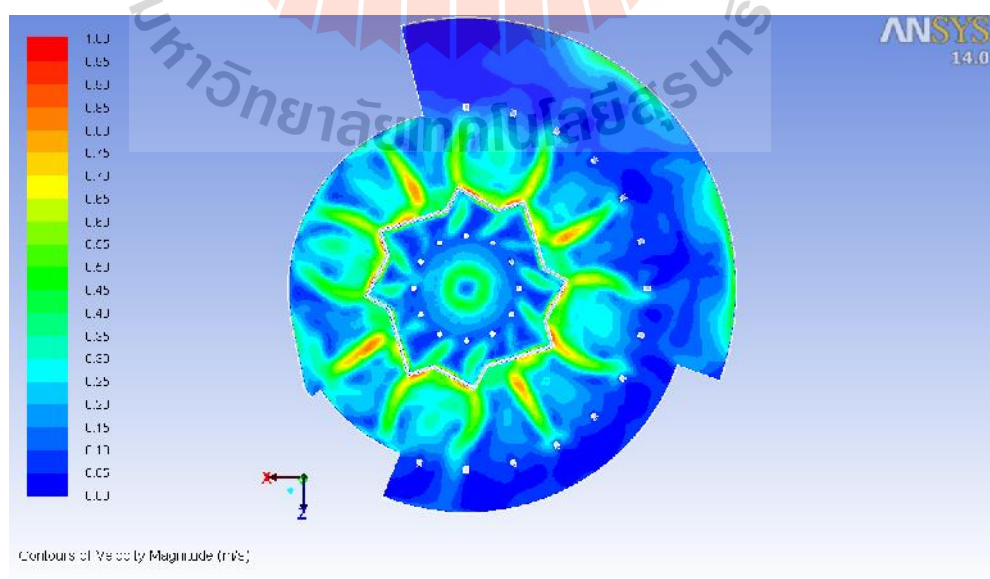
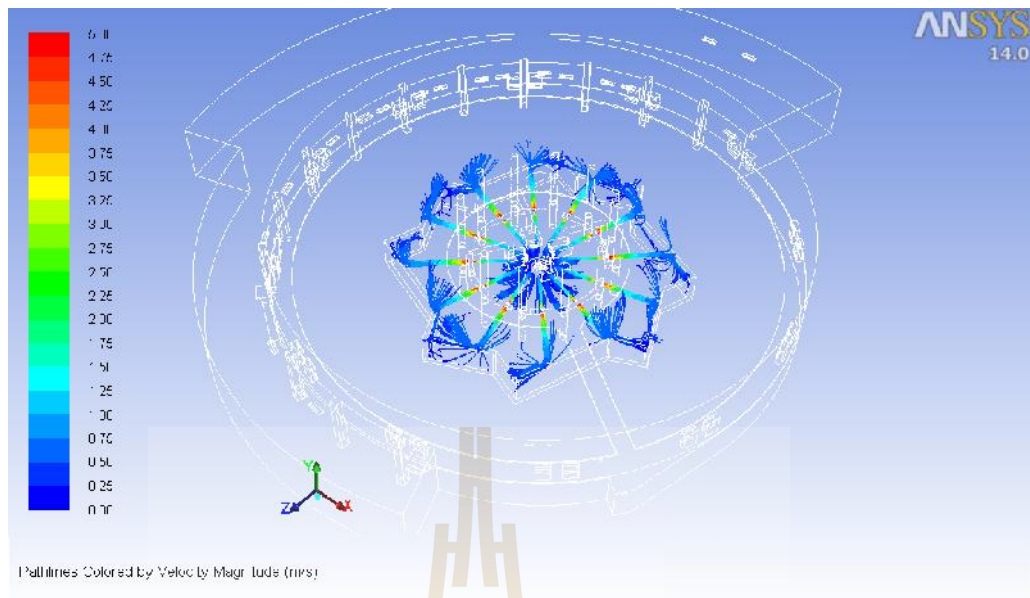


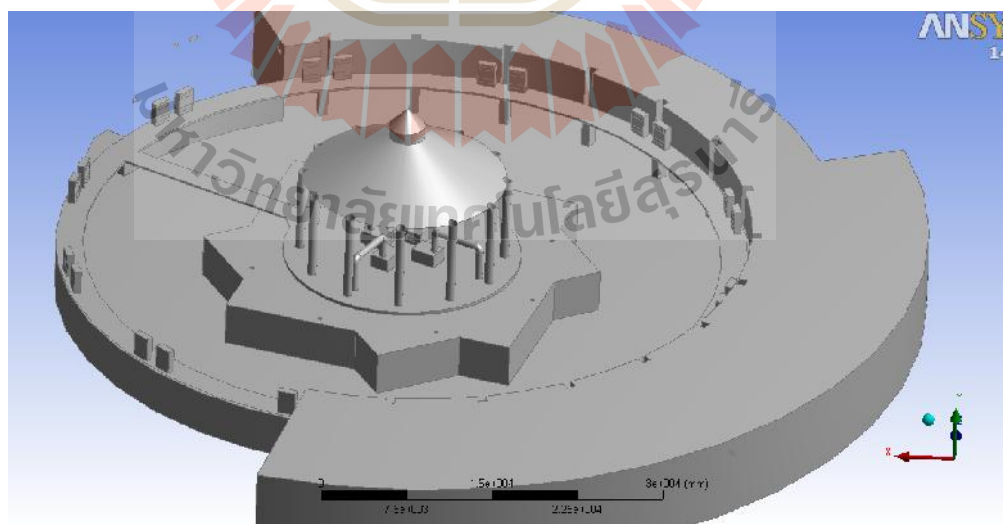
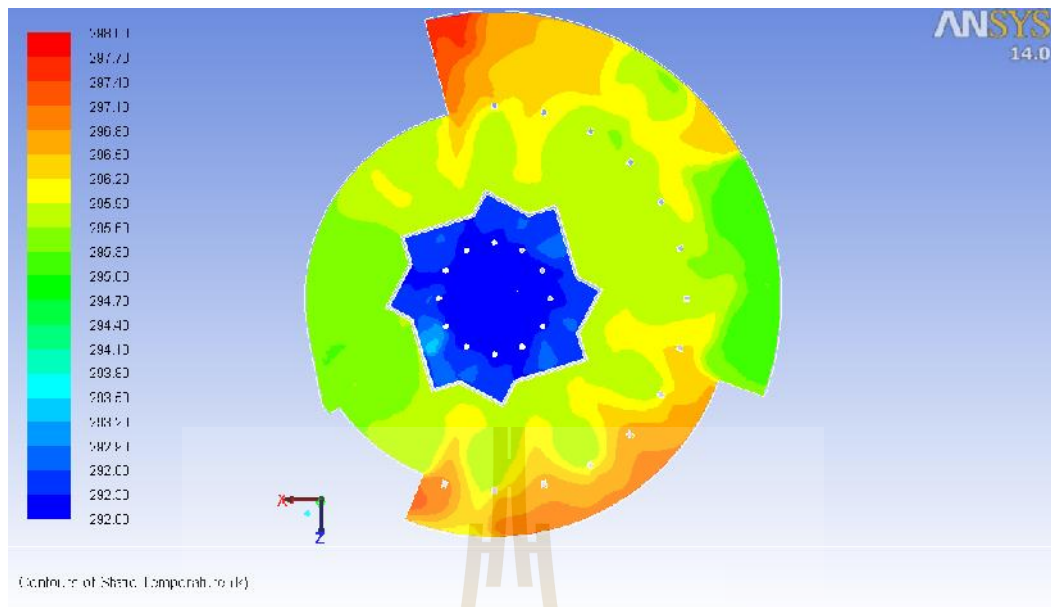
รูปที่ 5.44 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ตามแนวแกน R10-R20

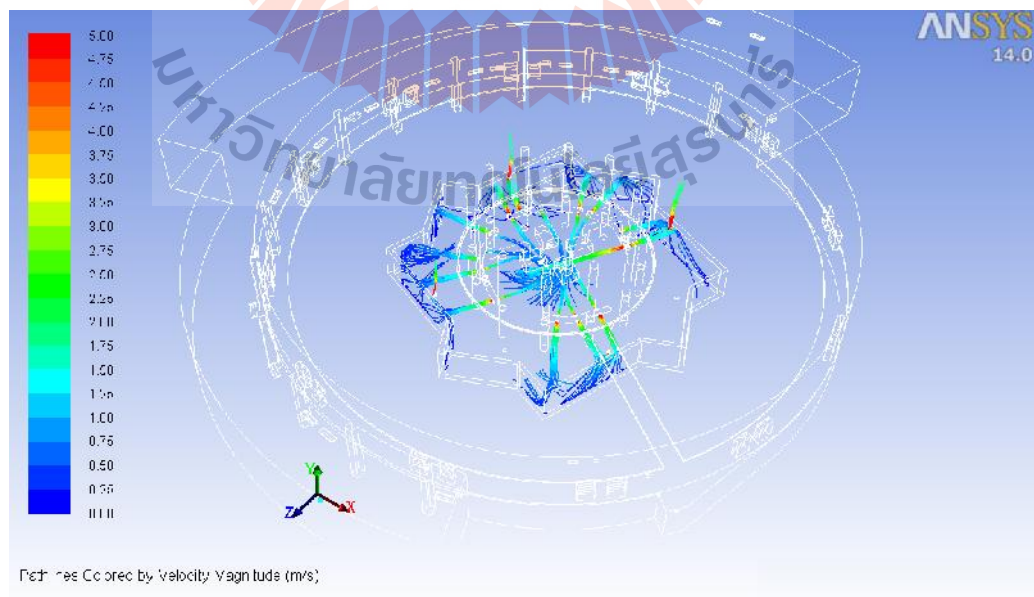
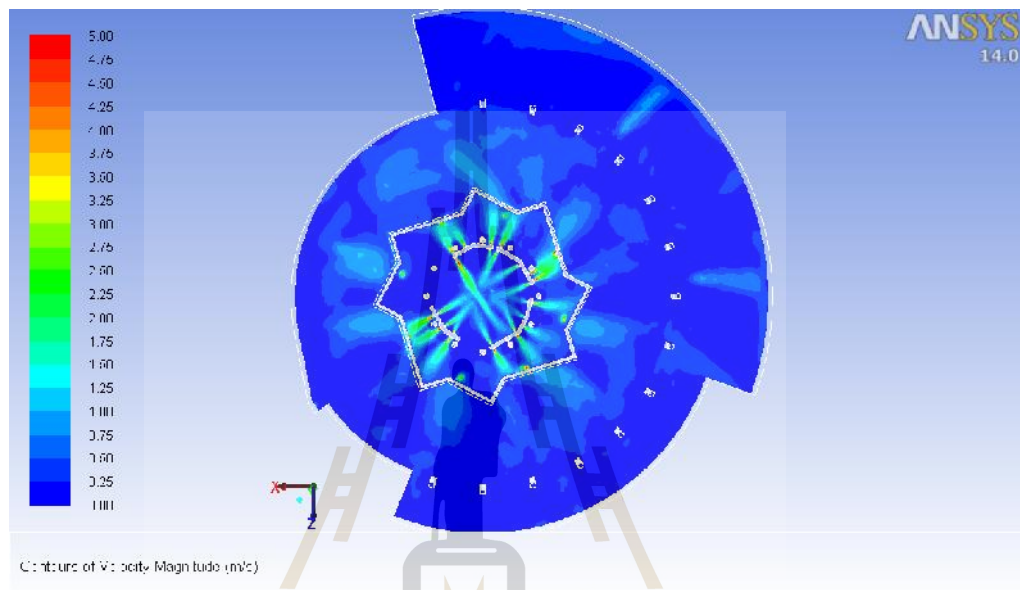
จากกราฟเปรียบเทียบความเร็วทั้ง 12 แนวแกน โดยที่ความเร็วต่ำ 0.1 - 0.3 เมตร/วินาที พบความแตกต่างของข้อมูลบ้างเล็กน้อย แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าการตรวจวัดมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น และโดยรวมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนเมื่อดูที่กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ จะเห็นว่าค่าการวัดแตกต่างจากผลจำลองประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าผู้ทำวิจัยได้ทำการลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงโดยตัดส่วนที่เป็นตู้จ่ายกำลังไฟฟ้าและตู้ควบคุมออก ซึ่งตู้เหล่านี้จะให้พลังงานความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิจากการตรวจวัดสูงขึ้นก็เป็นได้ แต่เมื่อดูที่แนวโน้มและการกระจายอุณหภูมิจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เป็นเหตุผลสนับสนุนความสามารถของแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศได้



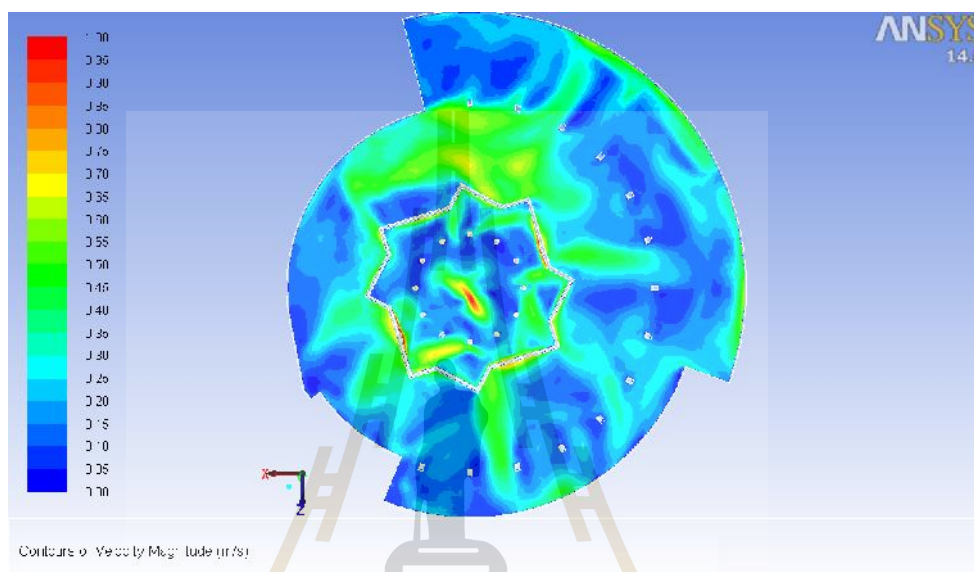




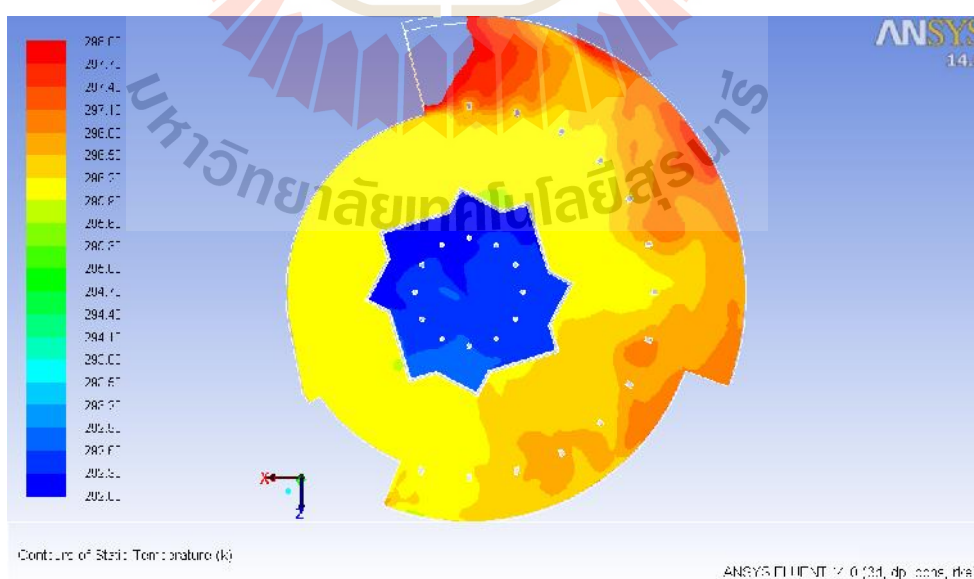




การกระจายความเร็วอากาศที่ระนาบความสูง 1.2 เมตร พบว่ามีกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ไม่สมมาตรกันตลอดโดยรอบบริเวณภายในกำแพงกันรังสี ความเร็วสูงบริเวณกึ่งกลางอาคาร ซึ่งเป็นบริเวณของช่องลมกลับของ AHU ระดับความเร็วอากาศอยู่ที่ 0.01 – 1 เมตร/วินาที(รูปที่6.8) และที่ระดับเดียวกันนี้ การกระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอดีขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีหลังคาปิด ระดับอุณหภูมิอยู่ 19-21 องศาเซลเซียส(รูปที่6.9)



รูปที่ 6.8 ความเร็วบนระนาบความสูง 1.2 เมตร(มีหลังคาปิด)



รูปที่ 6.9 อุณหภูมิบนระนาบความสูง 1.2 เมตร(มีหลังคาปิด)

6.3 ประเมินราคางานก่อสร้าง

การออกแบบปรับปรุงการไหลของอากาศทั้ง 2 แนวทาง ได้ส่งความต้องการให้ผู้เชี่ยวชาญเข้าประเมินราคาก่อสร้าง โดยมีการประมาณราคาจัดสร้างดังนี้

- 1.) ราคาประมาณการการปรับช่องจ่ายอากาศของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร
บริษัท แอดวานซ์สเต็ม จำกัด เสนอราคาจัดสร้าง 2,200,000 บาท ระยะเวลา
จัดสร้างและติดตั้ง 60 วัน
- 2.) ราคาประมาณการติดตั้งหลังคาให้กับส่วนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์
บริษัท FIT Construction จำกัด เสนอราคาจัดสร้าง 11,889,050 บาท ระยะเวลา
จัดสร้างและติดตั้ง 120 วัน

6.4 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากแบบจำลองที่ทำการออกแบบทั้ง 2 คือ 1.) ปรับช่องลมจ่ายของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร และ 2.) ติดตั้งหลังคาให้กับส่วนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นว่า โมเดลที่ 1 คือการปรับเปลี่ยนท่อส่งอากาศและช่องลมจ่ายใหม่ของ AHU ให้ผลการกระจายความเร็วและอุณหภูมิในตำแหน่งที่สนใจคือระนาบความสูง 1.2 เมตรได้ดีกว่า อีกทั้งงบประมาณที่ใช้ในการจัดทำต่ำกว่า ซึ่งจากผลการกระทำดังกล่าวจะส่งผลต่อเสถียรภาพในการควบคุมค่าอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์เครื่องเร่งอนุภาคที่ดีขึ้น

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศ ภายในอาคารรวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซีเอฟดี (CFD) เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของอากาศ ผลจากการศึกษานำไปสู่แนวทางการปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศที่สามารถรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและสม่ำเสมอได้ โดยได้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นได้ทำการศึกษาโดยการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ ภายในอาคารรวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโถงทดลอง นำผลจำลองที่ได้เทียบกับผลการวัด ณ ตำแหน่งต่างๆภายในอาคาร เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง แล้วทำการศึกษาแบบจำลอง 2 แบบ ที่มีการปรับปรุง การไหลเวียนอากาศภายในอาคาร เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งได้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

7.1 แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองเสมือนระบบปรับอากาศของอาคาร ใช้ระเบียบวิธีคำนวณทางซีเอฟดี ที่มีรูปแบบการไหลแตกต่างกัน 3 แบบ แล้วนำผลจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการวัด จากการศึกษาพบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน SST $k-\omega$ ให้ผลการจำลองความเร็วของอากาศสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ และแบบราบเรียบ ส่วนเมื่อดูที่อุณหภูมิพบว่ารูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\epsilon$ ให้ผลการจำลองสอดคล้องและมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าแบบปั่นป่วน SST $k-\omega$, และแบบราบเรียบ

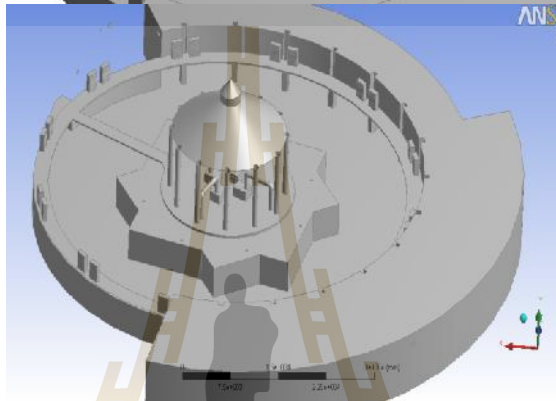
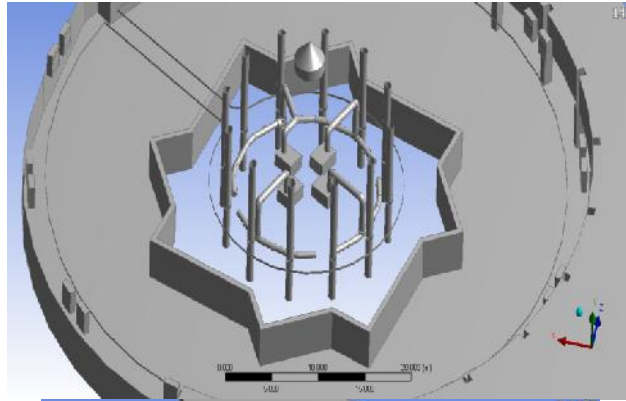
7.2 พฤติกรรมการไหลของอากาศในสถานะปัจจุบัน

ทำการศึกษาการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภายในอาคารรวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโถงทดลองในภาวะปัจจุบัน (มิถุนายน-กรกฎาคม 2558) โดยได้ทำการเก็บวัดข้อมูลความเร็วลมและอุณหภูมิ ช่องทาง เข้า-ออก อากาศภายในอาคารฯ แล้วนำค่าที่ได้ป้อนเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำผลจำลองที่

ได้เทียบกับผลการวัด ณ ตำแหน่งต่างๆภายในอาคาร เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยผลเปรียบเทียบพบว่าที่ความเร็วต่ำ 0.1 - 0.3 เมตร/วินาทีมีความแตกต่างของข้อมูลบ้างเล็กน้อย แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าการตรวจวัดมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น และโดยรวมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนเมื่อดูที่กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ จะเห็นว่าค่าการวัดแตกต่างจากผลจำลองประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าผู้ทำวิจัยได้ทำการลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงโดยตัดส่วนที่เป็นตู้จ่ายกำลังไฟฟ้าและตู้ควบคุมออก ซึ่งผู้เหล่านี้จะให้พลังงานความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิจากการตรวจวัดสูงขึ้นก็เป็นได้ แต่เมื่อดูที่แนวโน้มและการกระจายอุณหภูมิจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เป็นเหตุผลสนับสนุนความสามารถของแบบจำลองในการทำนายพฤติกรรมการไหลของอาคารได้

7.3 แบบจำลองการปรับปรุงการไหลของอากาศและข้อเสนอแนะ

ทำการศึกษาแบบจำลอง 2 แบบ ที่มีการปรับปรุง การไหลเวียนอากาศภายในอาคาร เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งประเมินความเป็นไปได้และประมาณราคาปรับปรุงดังกล่าว โดยได้วางแนวทางออกแบบไว้ 2 วิธี 1.) ปรับช่องจ่ายอากาศของ AHU ใหม่ให้มีความสมมาตร 2.) ติดตั้งหลังคาให้กับส่วนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 จากแบบจำลองที่ทำการออกแบบทั้ง 2 จะเห็นว่า โมเดลที่ 1 คือการปรับเปลี่ยนท่อส่งอากาศและช่องลมจ่ายใหม่ของ AHU ให้ผลการกระจายความเร็วและอุณหภูมิในตำแหน่งที่สนใจคือระนาบความสูง 1.2 เมตรได้ดีกว่า อีกทั้งงบประมาณที่ใช้ในการจัดทำต่ำกว่า ซึ่งจากผลการกระทำดังกล่าวจะส่งผลต่อเสถียรภาพในการควบคุมลำอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์เครื่องเรือนอากาศที่ดีขึ้น

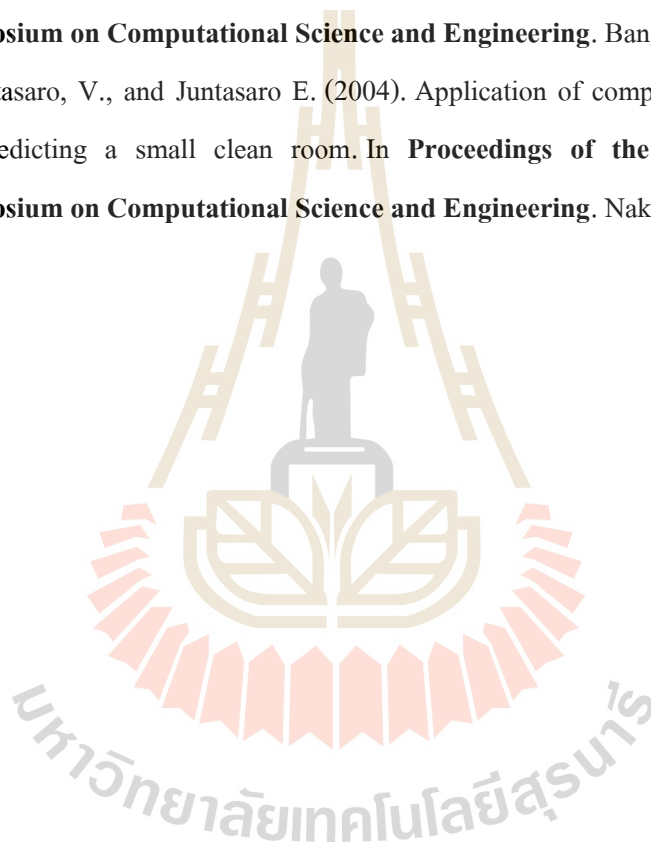


รายการอ้างอิง

- กิริติ สุกัญญ์ (2553). **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- เกริกฤทธิ์ สัทธศาสตร์ และ กิริติ สุกัญญ์. **การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน)**, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี
- คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (2553), **กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน**, กระทรวงพลังงาน
- จารุณี เข้มพินา(2554). **การศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านอาคารผนังสองชั้น**, วารสารวิชาการปทุมวัน ปีที่1 ฉบับที่1, หน้า23-28, สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
- จากร ไพบุลย์โรจน์รุ่ง, ณัฐ กาศยปนนท์ และมานะ อมรกิจบำรุง(2550). **แบบจำลองการไหลของอากาศในห้องปรับอากาศที่ติดพัฒลมดุดอากาศ**, การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร
- รายงานประจำปี สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน). 2554, สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา
- เอกชัย จันทสาโร, วรศักดิ์ จันทสาโร และ กุชงค์ อุทัยภาส. (มีนาคม 2548). CFD software for airflow simulation in a clean room. ใน **การประชุมประจำปี สวทช: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสู่เศรษฐกิจยุคโมเดล. ปทุมธานี: อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย.**
- เอกรงค์ สุขจิต, วรศักดิ์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2546). **การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.**
- ASHRAE. (1992). Standard 41.2-1987 (RA 92), **Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement**, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineer, Inc.

- Anderson, J. D. (1995). **Computational fluid dynamics: The basics with applications**. New York: McGraw-Hill.
- Awbi, H. B. (1998). Energy efficient room air distribution. **Renewable Energy** 15: 293-299.
- A.Stamou and I.Katsiris. Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer, **Building and Environment**, vol.41, 2006, P.1171–1181.
- Cengel, Y. A., and Boles, M. A. (1998). **Thermodynamics: An engineering approach** (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Cai, W. J., and Lee, E. L. (1999). Approaches for improving airflow uniformity in unidirectional flow cleanrooms. **Building and Environment** 34: 275-284.
- Chow, T. T., and Yang, X. Y. (2003). Performance of ventilation system in a non-standard operating room. **Building and Environment** 38: 1401-1411.
- Chow, W. K. (2001). Numerical studies of airflows induced by mechanical ventilation and air-conditioning (MVAC) systems. **Applied Energy** 68: 135-159.
- Chow, W. K., and Fung, W. Y. (1996). Numerical studies on the indoor air flow in the occupied zone of ventilated and air-conditioned space. **Building and Environment** 31: 319 - 344.
- Chang J.C., Tsai Z.D., Liu C.Y., Chug Y.C., Ueng T.S., Chen J.R., “**Numerical simulation of the air conditioning system design for the 3GeV TPS storage ring,**” Particle and Accelerator Conference (PAC), 2009, Vancouver, Canada.
- Chang J.C., Tsai Z.D., Liu C.Y., Chug Y.C., Chen J.R., Ke M.T., “**Numerical simulation and air conditioning system study for the storage ring of TLS,**” Particle and Accelerator Conference (PAC), 2010, Tokyo, Japan.
- Chang J.C., Ke M.T., Liu C.Y., and Chen J.R., “**Air Temperature Analysis And Control Improvement For The Large-scale Experimental Hall**”, The Third International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), 2004, Gyeongju, Korea
- Chen J.R., Wang D.J., Tsai Z.D., Kuan C.K., Ho S.C., and Chang J.C., “**Mechanical Stability Studies at the Taiwan Light Source**”, International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI 02), 2002, Illinois, USA

- Sarkar J., and Mandal S., “**CFD Modeling and validation of temperature and flow distribution in air conditioned space**”, International Refrigeration and Air Conditioning, 2008, Purdue, USA. Fluent theory and user guide book.
- Sinha, S. L., Arora, R. C., and Roy, S. (2000). Numerical simulation of two-dimensional room air flow with and without buoyancy. **Energy and Buildings** 32: 121-129.
- Sukjit, E., Juntasaro, V., Uthayopas, P., and Juntasaro E. (2003). Numerical simulation of turbulent flow in three-dimensional space. In **Proceedings of the 7th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Bangkok.
- Sukjit, E., Juntasaro, V., and Juntasaro E. (2004). Application of computational fluid dynamics for predicting a small clean room. In **Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Nakhon Ratchasima.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ
ของแบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แรงดันพัลคม 12V,12V: Heater off, off

ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)

V PY60					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.05	0.067	0.333	0.06	0.07
Z-850	0.103	0.197	0.117	0.107	0.113
Z-750	0.167	0.22	0.13	0.123	0.133
Z-650	0.18	0.14	0.077	0.083	0.14
Z-550	0.063	0.14	0.08	0.04	0.087
Z-450	0.007	0.01	0.01	0.02	0.017
Z-350	0.047	0.103	0.157	0.063	0.053
Z-250	0.06	0.107	0.167	0.043	0.043
Z-150	0.047	0.057	0.087	0.11	0.06
Z-50	0.077	0.043	0.093	0.047	0.15

V PY130					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.18	0.14	0.05	0.07	0.127
Z-850	0.263	0.24	0.177	0.13	0.18
Z-750	0.23	0.223	0.183	0.18	0.183
Z-650	0.183	0.243	0.07	0.1	0.207
Z-550	0.163	0.223	0.187	0.067	0.17
Z-450	0.153	0.153	0.123	0.173	0.04
Z-350	0.07	0.147	0.827	0.113	0.067
Z-250	0.12	0.153	0.11	0.177	0.08
Z-150	0.06	0.087	0.053	0.123	0.09
Z-50	0.06	0.047	0.027	0.048	0.063

V PY355					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.25	0.847	0.207	0.16	0.16
Z-850	0.25	0.263	1.353	0.243	0.153
Z-750	0.19	0.217	0.86	0.26	0.107
Z-650	0.183	0.293	0.273	0.217	0.203
Z-550	0.197	0.317	0.173	0.187	0.223
Z-450	0.2	0.31	0.14	0.14	0.243
Z-350	0.18	0.23	0.127	0.11	0.27
Z-250	0.147	0.183	0.127	0.073	0.223
Z-150	0.107	0.217	0.103	0.097	0.133
Z-50	0.1	0.167	0.15	0.197	0.103

แรงดันพัลคม 15V,15V: Heater off, off

ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)

V PY60

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.04	0.113	0.173	0.11	0.18
Z-850	0.117	0.153	0.193	0.127	0.157
Z-750	0.247	0.173	0.15	0.097	0.113
Z-650	0.197	0.12	0.053	0.197	0.15
Z-550	0.137	0.16	0.05	0.073	0.18
Z-450	0.02	0.02	0.02	0.04	0.043
Z-350	0.123	0.19	0.42	0.14	0.137
Z-250	0.077	0.18	0.273	0.143	0.213
Z-150	0.08	0.11	0.13	0.173	0.17
Z-50	0.077	0.087	0.04	0.097	0.15

V PY130

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.063	0.13	0.067	0.067	0.083
Z-850	0.07	0.177	0.173	0.12	0.107
Z-750	0.297	0.31	0.16	0.113	0.137
Z-650	0.307	0.31	0.083	0.187	0.13
Z-550	0.263	0.22	0.087	0.13	0.117
Z-450	0.13	0.08	0.127	0.123	0.07
Z-350	0.097	0.113	1.163	0.09	0.163
Z-250	0.177	0.2	0.02	0.187	0.21
Z-150	0.063	0.113	0.163	0.167	0.147
Z-50	0.04	0.027	0.057	0.073	0.043

V PY355

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.233	0.977	0.197	0.213	0.143
Z-850	0.277	0.257	1.143	0.18	0.153
Z-750	0.203	0.24	0.763	0.257	0.083
Z-650	0.283	0.31	0.18	0.253	0.167
Z-550	0.213	0.33	0.28	0.2	0.237
Z-450	0.187	0.307	0.193	0.16	0.233
Z-350	0.17	0.22	0.11	0.09	0.213
Z-250	0.12	0.217	0.093	0.057	0.237
Z-150	0.077	0.103	0.06	0.153	0.2
Z-50	0.083	0.153	0.16	0.18	0.123

แรงดันพัลด์ม 12V,12V: Heater on, on

ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)

V PY60					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.113	0.09	0.243	0.057	0.183
Z-850	0.227	0.147	0.147	0.11	0.123
Z-750	0.19	0.18	0.137	0.193	0.213
Z-650	0.21	0.077	0.063	0.193	0.127
Z-550	0.067	0.067	0.053	0.077	0.157
Z-450	0.013	0.013	0.013	0.03	0.05
Z-350	0.113	0.153	0.36	0.053	0.127
Z-250	0.057	0.11	0.15	0.073	0.09
Z-150	0.073	0.09	0.103	0.057	0.06
Z-50	0.047	0.123	0.08	0.06	0.093

V PY130					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.08	0.077	0.053	0.047	0.123
Z-850	0.21	0.233	0.13	0.083	0.127
Z-750	0.253	0.22	0.147	0.097	0.107
Z-650	0.2	0.1	0.083	0.13	0.097
Z-550	0.237	0.09	0.073	0.083	0.11
Z-450	0.087	0.08	0.14	0.08	0.09
Z-350	0.123	0.097	0.587	0.113	0.073
Z-250	0.103	0.18	0.1	0.17	0.163
Z-150	0.06	0.05	0.06	0.093	0.053
Z-50	0.06	0.067	0.04	0.063	0.023

V PY355					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.245	0.99	0.253	0.213	0.117
Z-850	0.22	0.23	0.86	0.267	0.15
Z-750	0.157	0.243	0.643	0.25	0.203
Z-650	0.19	0.187	0.233	0.217	0.16
Z-550	0.237	0.25	0.153	0.16	0.253
Z-450	0.207	0.21	0.247	0.19	0.25
Z-350	0.243	0.193	0.467	0.163	0.17
Z-250	0.22	0.167	0.23	0.127	0.247
Z-150	0.197	0.153	0.19	0.15	0.093
Z-50	0.13	0.187	0.197	0.237	0.073

แรงดันพัลคม 12V,12V: Heater on, on

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

T PY60

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	29	29.2	28.9	28.8	29.1
Z-850	28.4	29.1	29.1	28.7	28.6
Z-750	28.8	29.2	28.9	28.7	28.5
Z-650	29	29.2	28.8	29	28.5
Z-550	29.1	29.3	28.7	29.2	28.5
Z-450	28.9	29.4	28.7	30.2	28.5
Z-350	29.3	29.5	30	31.1	28.7
Z-250	29	29.2	27.4	29.2	29.2
Z-150	29.1	29.4	29.5	29.1	29.1
Z-50	28.9	29	28.7	28.8	28.8

T PY130

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	28.1	28.1	28.3	28.4	28.4
Z-850	28.9	29.2	29.2	28.7	28.7
Z-750	28.9	29.1	29.1	28.9	28.6
Z-650	29	29.2	29	28.9	28.7
Z-550	29	29.3	29.1	29.4	28.5
Z-450	29	29.3	29.5	29.5	28.7
Z-350	29	29.2	30.7	29.9	28.8
Z-250	28.4	28.4	28.2	28.6	28.5
Z-150	28.2	28.2	28.2	28.9	28.7
Z-50	28.1	28.1	28.2	28.3	28.2

T PY355

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	29.5	30.4	29.5	28.4	28.7
Z-850	29.4	30.8	32.9	28.4	28.7
Z-750	29.2	31	31.6	28.5	28.6
Z-650	29.5	30.3	30.2	28.3	28.5
Z-550	29.7	29.5	29.4	28.2	28.4
Z-450	29.5	29.5	29	28.2	28.4
Z-350	29.4	29.4	28.6	28.4	28.4
Z-250	29.4	29.5	28.6	28.4	28.4
Z-150	29.5	29.4	29	28.4	28.4
Z-50	29.5	29.5	29	28.6	28.4

แรงดันพัลคม 15V,15V: Heater on, on

ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)

V PY60					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.083	0.043	0.13	0.09	0.08
Z-850	0.183	0.133	0.15	0.133	0.09
Z-750	0.19	0.11	0.083	0.18	0.113
Z-650	0.187	0.127	0.163	0.123	0.12
Z-550	0.107	0.03	0.123	0.113	0.123
Z-450	0.02	0.01	0.013	0.023	0.023
Z-350	0.093	0.117	0.49	0.11	0.1
Z-250	0.09	0.093	0.187	0.153	0.107
Z-150	0.083	0.083	0.11	0.14	0.093
Z-50	0.087	0.063	0.05	0.09	0.117

V PY130					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.13	0.087	0.195	0.06	0.08
Z-850	0.227	0.217	0.217	0.207	0.16
Z-750	0.27	0.233	0.25	0.21	0.12
Z-650	0.427	0.23	0.093	0.143	0.077
Z-550	0.283	0.233	0.12	0.06	0.123
Z-450	0.15	0.14	0.163	0.16	0.15
Z-350	0.153	0.157	0.86	0.143	0.17
Z-250	0.123	0.217	0.185	0.21	0.1
Z-150	0.07	0.143	0.193	0.163	0.067
Z-50	0.047	0.05	0.06	0.103	0.1

V PY355					
Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	0.26	0.99	0.18	0.16	0.15
Z-850	0.23	0.17	0.95	0.25	0.18
Z-750	0.19	0.19	0.64	0.26	0.17
Z-650	0.18	0.28	0.26	0.18	0.27
Z-550	0.2	0.28	0.2	0.18	0.24
Z-450	0.18	0.23	0.12	0.13	0.25
Z-350	0.25	0.39	0.11	0.09	0.14
Z-250	0.17	0.13	0.07	0.12	0.18
Z-150	0.11	0.18	0.11	0.12	0.12
Z-50	0.09	0.2	0.15	0.18	0.1

แรงดันพัลคม 15V,15V: Heater on, on

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

T PY60

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	29.3	29.4	29.3	29	29
Z-850	29.4	29.7	29.6	29.2	29.1
Z-750	29.6	29.7	29.4	29.3	29
Z-650	29.5	29.7	29.2	29.5	29
Z-550	29.5	29.8	29.3	29.9	29
Z-450	29.5	29.9	29.6	30.3	29
Z-350	29.5	29.7	33.4	31	29
Z-250	29.8	29.8	30.3	30.6	30.2
Z-150	29.9	29.9	30.1	30.3	30.3
Z-50	29.4	29.5	29.3	29.4	29.5

T PY130

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	29	29.1	29	28.9	29
Z-850	29	30.1	29.8	29.4	29.3
Z-750	29.5	30.2	29.7	29.4	29.2
Z-650	29.9	30.3	29.7	29.7	29.2
Z-550	29.9	30.3	29.7	30.1	29.1
Z-450	30	30.4	30.4	30.6	29.2
Z-350	29.9	30.4	31.5	31.2	29.3
Z-250	29.4	29.5	29.5	30.1	29.9
Z-150	29.5	29.6	29.4	29.6	29.9
Z-50	29.5	29.3	29.4	29.7	28.6

T PY355

Position x/z	X-666	X-533	X-400	X-266	X-133
Z-950	29.7	30.8	30.7	29.4	29.6
Z-850	29.4	31.2	34.1	29.2	29.3
Z-750	29.5	31.4	32.9	29.3	29.2
Z-650	29.8	31.3	31.8	29.2	29.1
Z-550	30	30.9	30.8	29.2	29.1
Z-450	30	30.4	30.5	29.2	29
Z-350	29.9	30.1	30.2	29.3	29
Z-250	29.8	29.9	30.1	29.6	29
Z-150	29.8	29.7	30.4	29.6	29.2
Z-50	29.7	29.7	30.3	29.7	29.2

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ
ภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R1 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.13	0.11	0.12	0.12	24.6
9	0.08	0.17	0.1	0.12	24.7
10				Not measured	
11	0.13	0.04	0.19	0.12	25.1
12	0.12	0.11	0.13	0.12	24.9
13	0.31	0.25	0.29	0.28	24.9
14	0.17	0.12	0.37	0.22	24.6

Column R1 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.41	0.31	0.32	0.35	24.5
9	0.67	0.52	0.32	0.50	24.4
10				Not measured	
11	0.09	0.15	0.16	0.13	25.5
12	0.22	0.2	0.15	0.19	25.2
13	0.06	0.12	0.09	0.09	24.9
14	0.08	0.04	0.19	0.10	24.9

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R2 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.30	0.33	0.34	0.32	24.9
13	0.18	0.19	0.24	0.20	24.4
14	0.16	0.13	0.14	0.14	24.5

Column R2 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.01	0.03	0.02	0.02	25
13	0.15	0.12	0.07	0.11	24.1
14	0.04	0.01	0.03	0.03	24.8

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R3 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5	0.63	0.58	0.4	0.54	25.6
6	0.43	0.53	0.64	0.53	25.6
7	0.11	0.17	0.13	0.14	25.5
8	0.28	0.33	0.23	0.28	25.6
9	0.18	0.17	0.05	0.13	25.5
10	0.09	0.12	0.1	0.10	25.5
11	0.16	0.1	0.05	0.10	25.5
12	0.15	0.1	0.05	0.10	25.6
13	0.04	0.07	0.27	0.13	25.5
14	0.14	0.27	0.24	0.22	25.5

Column R3 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5	0.12	0.06	0.04	0.07	25.7
6	0.28	0.31	0.33	0.31	25.7
7	0.11	0.08	0.03	0.07	25.8
8	0.22	0.13	0.26	0.20	25.6
9	0.23	0.22	0.20	0.22	25.6
10	0.09	0.08	0.03	0.07	25.3
11	0.38	0.28	0.31	0.32	25.4
12	0.19	0.18	0.04	0.14	25.5
13	0.15	0.16	0.20	0.17	25.3
14	0.35	0.46	0.33	0.38	24.7

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R4 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1					
2					
3				Not measured	
4					
5					
6	0.23	0.41	0.57	0.40	25.7
7				Not measured	
8	0.11	0.18	0.12	0.14	26.3
9	0.09	0.06	0.10	0.08	25.2
10	0.10	0.06	0.08	0.08	25.4
11	0.11	0.26	0.11	0.16	25.7
12	0.06	0.02	0.02	0.03	25.9
13	0.06	0.02	0.07	0.05	25.4
14	0.16	0.11	0.19	0.15	25.4

Column R4 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.11	0.06	0.05	0.07	26.2
7				Not measured	
8	0.11	0.12	0.12	0.12	25.4
9	0.09	0.12	0.14	0.12	25.4
10	0.06	0.15	0.12	0.11	25.1
11	0.24	0.18	0.24	0.22	25.8
12	0.12	0.10	0.11	0.11	25.8
13	0.09	0.07	0.05	0.07	26
14	0.24	0.23	0.21	0.23	25.2

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R5 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13	0.11	0.26	0.23	0.20	25.9
14	0.18	0.03	0.1	0.10	26

Column R5 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13	0.30	0.06	0.02	0.13	26.3
14	0.03	0.06	0.10	0.06	25.6

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column Z' Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.15	0.14	0.09	0.38	26.5
13	0.07	3.13	0.12	0.32	26.5
14	0.12	0.12	0.08	0.32	26.7

Column Z' Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.04	0.17	0.22	0.43	26.3
13	0.18	0.14	0.22	0.54	26.5
14	0.04	0.09	0.07	0.2	26.5

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R6 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.22	0.13	0.14	0.16	26.1
7	0.03	0.08	0.07	0.06	26.1
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.22	0.16	0.07	0.45	26.4
13	0.12	0.13	0.09	0.34	26.5
14	0.16	0.12	0.09	0.37	26.1

Column R6 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.15	0.11	0.07	0.33	26.3
7	0.09	0.02	0.06	0.17	26.1
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12	0.13	0.16	0.09	0.38	26.3
13	0.05	0.09	0.08	0.22	26.5
14	0.07	0.03	0.11	0.21	26.4

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R7 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13	0.17	0.12	0.19	0.48	26.3
14	0.13	0.05	0.02	0.20	26.3

แกน R7 แกน X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13	0.06	0.08	0.11	0.25	25.2
14	0.08	0.13	0.07	0.28	26.5

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R8 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.06	0.14	0.12	0.11	25.7
12	0.03	0.06	0.07	0.05	25.7
13	0.06	0.18	0.21	0.15	25.7
14	0	0.03	0.01	0.01	25.7

Column R8 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.11	0.08	0.05	0.24	25.8
12	0.03	0.05	0.16	0.24	25.8
13	0.05	0.02	0.12	0.19	25.6
14	0.24	0.1	0.06	0.40	25.7

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R9 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.09	0.07	0.03	0.19	26
9	0.06	0.07	0.02	0.15	26.2
10	0.18	0.13	0.09	0.4	25.8
11	0.12	0.09	0.13	0.34	26
12	0.07	0.05	0.11	0.23	25.9
13	0.11	0.15	0.14	0.4	25.8
14	0.08	0.1	0.09	0.27	25.7

Column R9 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.23	0.19	0.17	0.59	26
9	0.06	0.11	0.16	0.33	25.9
10	0.13	0.06	0.02	0.21	25.9
11	0.01	0.02	0.05	0.08	26
12	0.09	0.07	0.12	0.28	26
13	0.01	0.02	0.08	0.11	25.7
14	0.02	0.01	0.04	0.07	25.9

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R10 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.09	0.15	0.12	0.36	26.1
8	0.19	0.12	0.09	0.4	26.1
9	0.21	0.13	0.11	0.45	26.1
10	0.3	0.11	0.13	0.54	25.8
11	0.23	0.07	0.06	0.36	26
12	0.17	0.12	0.05	0.34	25.8
13	0.17	0.12	0.22	0.51	26
14	0.21	0.19	0.23	0.63	26.2

Column R10 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.13	0.24	0.11	0.48	25.9
8	0.09	0.12	0.08	0.29	26.1
9	0.13	0.1	0.08	0.31	25.8
10	0.14	0.37	0.36	0.87	25.9
11	0.13	0.15	0.16	0.44	25.6
12	0.3	0.11	0.12	0.53	25.9
13	0.1	0.07	0.12	0.29	26
14	0.07	0.25	0.33	0.65	26.2

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column X' Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1	0.21	0.16	0.11	0.16	25.9
2	0.13	0.21	0.08	0.14	26.3
3	0.19	0.24	0.21	0.21	26
4	0.25	0.24	0.20	0.23	26.5
5	0.29	0.25	0.20	0.25	26
6	0.14	0.33	0.25	0.24	26.2
7	0.06	0.17	0.18	0.14	26
8				Not measured	
9				Not measured	
10	0.24	0.16	0.18	0.19	27
11	0.36	0.33	0.24	0.31	26.2
12	0.19	0.11	0.27	0.19	26.5
13	0.12	0.15	0.17	0.15	26.3
14	0.05	0.02	0.08	0.05	26.5

Column X' Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1	0.07	0.05	0.01	0.04	26.1
2	0.02	0.13	0.17	0.11	25.8
3	0.11	0.04	0.04	0.06	26.2
4	0.07	0.14	0.02	0.08	26.2
5	0.02	0.01	0.03	0.02	26.5
6	0.13	0.18	0.08	0.13	26.1
7	0.02	0.15	0.10	0.09	26
8				Not measured	
9				Not measured	
10	0.05	0.02	0.10	0.06	26.4
11	0.14	0.12	0.08	0.11	26.6
12	0.08	0.17	0.18	0.14	26.4
13	0.04	0.05	0.06	0.05	27
14	0.05	0.07	0.09	0.07	26

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R11 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.14	0.27	0.17	0.19	25.7
8	0.16	0.11	0.19	0.15	26
9	0.23	0.22	0.30	0.25	25.9
10	0.03	0.02	0.07	0.04	25.1
11	0.02	0.03	0.04	0.03	26.4
12	0.17	0.03	0.08	0.09	25.6
13	0.03	0.08	0.02	0.04	25.3
14	0.21	0.11	0.20	0.17	25.5

Column R11 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.28	0.58	0.32	0.39	25.9
8	0.18	0.27	0.21	0.22	25.6
9	0.12	0.17	0.23	0.17	26.3
10	0.13	0.18	0.15	0.15	25.3
11	0.25	0.18	0.10	0.18	25.6
12	0.12	0.08	0.10	0.10	26.2
13	0.23	0.11	0.16	0.17	25.7
14	0.04	0.05	0.14	0.08	25.2

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R12 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.49	0.51	0.56	0.52	25.8
7	0.32	0.40	0.80	0.51	25.7
8	0.07	0.22	0.16	0.15	26.2
9	0.07	0.20	0.07	0.11	26.6
10	0.16	0.11	0.21	0.16	26.1
11	0.04	0.10	0.11	0.08	26.4
12	0.01	0.08	0.10	0.06	26.4
13	0.19	0.08	0.09	0.12	26.1
14	0.07	0.03	0.11	0.07	26

Column R12 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.18	0.22	0.39	0.26	26
7	0.32	0.34	0.14	0.27	26.3
8	0.13	0.10	0.30	0.18	26.9
9	0.12	0.07	0.06	0.08	26.9
10	0.09	0.12	0.11	0.11	26.6
11	0.04	0.08	0.07	0.06	26.5
12	0.07	0.03	0.02	0.04	26.3
13	0.16	0.20	0.10	0.15	26.7
14	0.06	0.24	0.22	0.17	26.4

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R13 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.39	0.41	0.52	0.44	26.2
7	0.51	0.49	0.36	0.45	26.1
8	0.27	0.26	0.37	0.30	26.5
9	0.44	0.45	0.41	0.43	26.9
10	0.22	0.19	0.35	0.25	27.2
11				Not measured	
12	0.06	0.08	0.20	0.11	26.8
13	0.01	0.02	0.06	0.03	25.6
14				Not measured	

Column R13 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.06	0.09	0.24	0.13	26.6
7	0.18	0.07	0.06	0.10	26.3
8	0.11	0.12	0.18	0.14	26.5
9	0.16	0.20	0.28	0.21	27
10	0.14	0.25	0.15	0.18	27.1
11				Not measured	
12	0.15	0.24	0.09	0.16	27.1
13	0.11	0.05	0.04	0.07	26.1
14				Not measured	

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R14 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4	0.39	0.42	0.44	0.42	24.1
5	0.58	0.48	0.68	0.58	24.5
6	0.52	0.31	0.24	0.36	24.5
7	0.36	0.27	0.45	0.36	24.6
8	0.45	0.37	0.44	0.42	24.6
9	0.12	0.03	0.13	0.09	24.9
10	0.22	0.14	0.24	0.20	25.3
11	0.16	0.11	0.20	0.16	25.2
12	0.16	0.19	0.23	0.19	25.4
13	0.12	0.11	0.17	0.13	25.7
14	0.13	0.19	0.17	0.16	25.1

Column R14 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4	0.22	0.35	0.41	0.33	24.2
5	0.33	0.39	0.54	0.42	24.5
6	0.23	0.26	0.16	0.22	24.8
7	0.39	0.23	0.28	0.30	24.6
8	0.24	0.30	0.23	0.26	24.7
9	0.12	0.08	0.19	0.13	24.9
10	0.18	0.17	0.20	0.18	25.1
11	0.19	0.27	0.16	0.21	25.5
12	0.21	0.24	0.19	0.21	25.5
13	0.11	0.13	0.06	0.10	25.1
14	0.07	0.18	0.14	0.13	25.2

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R15 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13				Not measured	
14				Not measured	

Column R15 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1	เว้น			Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13				Not measured	
14				Not measured	

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column Z Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13				Not measured	
14				Not measured	

Column Z Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11				Not measured	
12				Not measured	
13				Not measured	
14				Not measured	

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R16 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.17	0.14	0.15	0.15	24.6
9	0.20	0.12	0.17	0.16	24.6
10	0.19	0.24	0.26	0.23	24.6
11	0.06	0.21	0.23	0.17	24.6
12	0.20	0.22	0.32	0.25	24.7
13	0.32	0.22	0.20	0.25	24.5
14	0.21	0.19	0.23	0.21	24.4

Column R16 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8	0.14	0.20	0.19	0.18	24.6
9	0.14	0.17	0.08	0.13	24.7
10	0.14	0.22	0.08	0.15	24.6
11	0.17	0.12	0.18	0.16	24.7
12	0.23	0.17	0.05	0.15	24.6
13	0.17	0.22	0.30	0.23	24.5
14	0.17	0.14	0.16	0.16	24.5

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R17 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2	0.42	0.35	0.56	0.44	24.7
3	0.14	0.33	0.22	0.23	24.8
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.09	0.28	0.26	0.21	25.2
8	0.2	0.3	0.28	0.26	25.2
9				Not measured	
10	0.05	0.03	0.11	0.06	25.5
11	0.08	0.09	0.02	0.06	25
12	0.13	0.08	0.02	0.08	25
13	0.14	0.06	0.03	0.08	25
14	0.05	0.04	0.01	0.03	24.6

Column R17 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2	0.40	0.43	0.44	0.42	24.7
3	0.33	0.31	0.24	0.29	24.8
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7	0.08	0.18	0.17	0.14	25.1
8	0.15	0.33	0.37	0.28	25.4
9				Not measured	
10	0.05	0.09	0.11	0.08	25.4
11	0.19	0.16	0.13	0.16	25.4
12	0.01	0.00	0.03	0.01	25.2
13	0.08	0.01	0.02	0.04	24.8
14	0.13	0.18	0.21	0.17	24.8

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R18 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.27	0.19	0.04	0.17	24.8
12	0.18	0.29	0.21	0.23	24.7
13	0.15	0.21	0.18	0.18	24.6
14	0.01	0.10	0.13	0.08	24.7

Column R18 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6				Not measured	
7				Not measured	
8				Not measured	
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.03	0.02	0.08	0.04	24.9
12	0.21	0.14	0.12	0.16	24.8
13	0.17	0.15	0.06	0.13	24.7
14	0.05	0.11	0.19	0.12	24.7

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R19 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.26	0.27	0.3	0.28	25.5
7	0.2	0.15	0.09	0.15	25.3
8	0.11	0.21	0.08	0.13	25.2
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.17	0.2	0.16	0.18	25.1
12	0.15	0.16	0.12	0.14	25.2
13	0.12	0.07	0.18	0.12	24.7
14	0.19	0.18	0.2	0.19	24.6

Column R19 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.26	0.34	0.29	0.30	25.3
7	0.29	0.24	0.23	0.25	25.3
8	0.21	0.26	0.35	0.27	25.2
9				Not measured	
10				Not measured	
11	0.26	0.3	0.24	0.27	25.3
12	0.2	0.25	0.16	0.20	25
13	0.11	0.16	0.2	0.16	24.9
14	0.15	0.13	0.24	0.17	24.5

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column R20 Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2	0.07	0.02	0.11	0.07	25.7
3	0.19	0.17	0.05	0.14	25.7
4	0.07	0.13	0.03	0.08	25.7
5	0.03	0.04	0.18	0.08	25.7
6	0.24	0.34	0.35	0.31	25.4
7	0.03	0.13	0.04	0.07	25.7
8				Not measured	
9				Not measured	
10	0.13	0.16	0.1	0.13	25.4
11	0.01	0.09	0.16	0.09	25.5
12	0.09	0.11	0.13	0.11	25.6
13	0.05	0.06	0.03	0.05	26.2
14	0.17	0.15	0.19	0.17	25.1

Column R20 Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2	0.18	0.1	0.09	0.12	25.8
3	0.01	0.04	0.03	0.03	25.9
4	0.08	0.12	0.13	0.11	25.8
5	0.11	0.09	0.11	0.10	25.5
6	0.13	0.06	0.08	0.09	25.4
7	0.13	0.18	0.23	0.18	25.4
8				Not measured	
9				Not measured	
10	0.04	0.07	0.06	0.06	25.6
11	0.22	0.17	0.26	0.22	25.4
12	0.29	0.32	0.24	0.28	25.6
13	0.01	0.05	0.04	0.03	25.3
14	0.18	0.15	0.12	0.15	25.2

ข้อมูลตรวจวัดความเร็วและอุณหภูมิอากาศ

Column X Axis Z					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.36	0.32	0.40	0.36	25.2
7	0.36	0.40	0.31	0.36	25.4
8	0.13	0.19	0.15	0.16	25.5
9	0.05	0.06	0.13	0.08	25.5
10	0.07	0.06	0.03	0.05	25.5
11	0.01	0.04	0.06	0.04	25.6
12	0.23	0.16	0.06	0.15	25.8
13	0.16	0.10	0.08	0.11	25.4
14	0.17	0.15	0.11	0.14	25.5

Column X Axis X					
No.	Time 1	Time 2	Time 3	Avg.(m/s)	Temp.(C °)
1				Not measured	
2				Not measured	
3				Not measured	
4				Not measured	
5				Not measured	
6	0.09	0.08	0.16	0.11	25.2
7	0.07	0.03	0.13	0.08	25.4
8	0.05	0.02	0.09	0.05	25.4
9	0.16	0.21	0.13	0.17	25.5
10	0.06	0.02	0.08	0.05	25.5
11	0.03	0.08	0.02	0.04	25.6
12	0.16	0.27	0.23	0.22	25.4
13	0.06	0.03	0.04	0.04	25.5
14	0.01	0.06	0.09	0.05	25.2

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

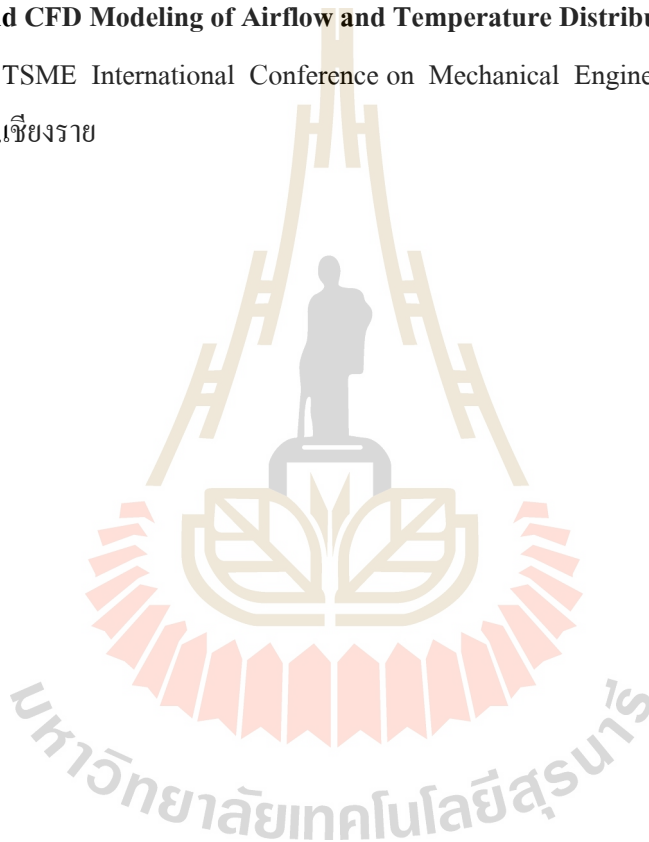
รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

เกริกฤทธิ์ สิริพิศาตร์, กิรติ สุลักษณ์ (2556) การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลอง: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 27 (ME - NETT'27) 16 - 18 ตุลาคม 2556 จ.ชลบุรี

เกริกฤทธิ์ สิริพิศาตร์, กิรติ สุลักษณ์, ปรีชา วานวงษ์ และพงศวัฒน์ วิชัยเมือง (2557)

Verification and CFD Modeling of Airflow and Temperature Distribution in Enclosed Space

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering 17 - 18 ธันวาคม 2557 จ.เชียงราย



การจำลองการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน
และห้องโถงทดลอง: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
Simulation of Airflow Pattern inside a Storage Ring and Experimental Hall Building
Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)

เกริกฤทธิ์ สิริพิศาตร์¹ และ กীরติ สุลักษณ์²

¹สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

111 ถนนพหลโยธิน ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนพหลโยธิน ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: Email: keerati@slac.th, โทร. 044-224235, โทรสาร 044-224613

บทคัดย่อ

แสงซินโครตรอนถูกผลิตขึ้นโดยอาศัยการเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสง จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปยังวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน แล้วบังคับให้เลี้ยวเบนเพื่อปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมาวงแหวนดังกล่าวนี้ ประกอบด้วยท่อสุญญากาศซึ่งใช้เป็นเส้นทางเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน และอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้ปรับค่าสมบัติและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน ดังนั้น เสถียรภาพของลำแสงจึงขึ้นอยู่กับค่าสมบัติและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ดังกล่าวให้ได้เที่ยงตรงที่สุด อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อมรอบวงแหวนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ท่อสุญญากาศและอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการหดหรือขยายตัว ส่งผลให้สมบัติและทิศทางของลำแสงเบี่ยงเบนไปจากที่ควบคุม ทำให้เสถียรภาพของลำแสงลดลงจนถึงขั้นใช้งานไม่ได้ งานวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนและห้องโถงทดลอง การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซีเอฟดี ผลที่ได้จะนำไปสู่แนวทางการปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศที่เหมาะสมขึ้น

คำหลัก: แสงซินโครตรอน, ห้องโถงทดลอง, วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน, การจำลองการไหล, ซีเอฟดี

Abstract

Synchrotron light is generated by accelerating the electron with the speed close to the speed of light. After that, the generated electron will be transmitted into the storage ring and its moving direction will be controlled within the curvature path in order to release the synchrotron light. This storage ring consists of vacuum tube which is used as the moving path of the electron. The electron properties and its moving direction are controlled by the electromagnet. Therefore, the stability of the electron beam is depended on the accuracy in controlling those properties and direction of the electron beam as much as possible. However, changing in temperature surrounding the storage ring is one of the main influents that effect to the vacuum tube and electromagnet devices in which both can be deformed due to the effect of thermal stress. This results to the incorrect direction and properties of the electron beam leading to the

CST-325

unavailable of the light. The research presents the air flow behaviors within the experimental hall and storage ring. The CFD simulation has been investigated in the study. The results of the study will be used to improve the air ventilation system.

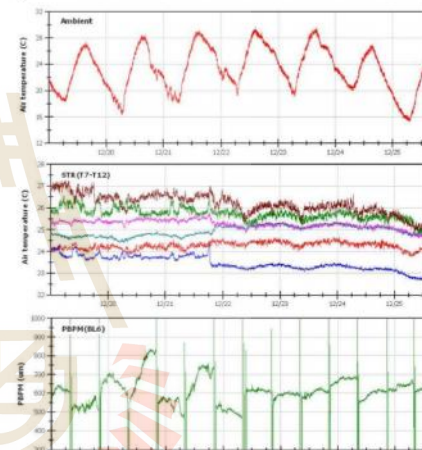
Keyword: Synchrotron light, Experimental hall, Storage ring, Flow simulation, CFD

1. บทนำ

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นหน่วยงานที่เปิดให้บริการใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอนแก่นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยหลายแขนง ทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชนตั้งแต่ปี 2546 ถึงปัจจุบัน [1] การผลิตแสงซินโครตรอนใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและมีความละเอียดอ่อน ผลจากการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่งบวกกับปัจจัยกระทบต่างๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแสงซินโครตรอนไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ ที่ผ่านมาก็มีแผนการปรับปรุงระบบผลิตแสงซินโครตรอนให้ได้ประสิทธิภาพตรงตามความต้องการของผู้ใช้มาโดยตลอด แนวทางหนึ่งคือการปรับปรุงระบบปรับอากาศและระบายอากาศภายในอาคารเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ให้สามารถรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมและสม่ำเสมอได้

แสงซินโครตรอนผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยอาศัยการเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสง แล้วบังคับให้เลี้ยวเบนภายใต้สนามแม่เหล็กเพื่อปลดปล่อยแสงซินโครตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งนี้จะถูกเก็บและบังคับให้เลี้ยวเบนใน "วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring)" ซึ่งประกอบด้วยท่อสุญญากาศและอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ปรับค่าคุณสมบัติและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน ดังนั้น ประสิทธิภาพของแสงซินโครตรอนจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการปรับค่าดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อมรอบวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน มักทำให้ท่อสุญญากาศและอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการหดหรือขยายตัวจากผลของความเค้นเชิงความร้อน ส่งผลให้สมบัติของลำแสงเบี่ยงเบนไปจากที่ควบคุมไว้ ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์

ของการใช้งาน ในรูปที่ 1 (บน) แสดงอุณหภูมิแวดล้อมรอบอุปกรณ์และวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $24 \pm 4^{\circ}\text{C}$ ซึ่งนับว่าสูง ทำให้อุณหภูมิบนอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของลำแสงไม่คงที่ดังแสดงในรูปกลางและล่าง ตามลำดับ



รูปที่ 1 (บน) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (กลาง) อุณหภูมิบนอุปกรณ์วงกักเก็บอิเล็กตรอนที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัด และ (ล่าง) ความไม่เสถียรของลำแสง

ความไม่เสถียรภาพดังกล่าวได้รับการพิสูจน์ว่าเกิดจากพฤติกรรมการไหลเวียนอากาศไม่เหมาะสม มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในตัวอาคารและอุโมงค์วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ประเทศไต้หวัน พบว่าการจัดวางตำแหน่งช่องจ่ายอากาศและช่องกลับอากาศที่เหมาะสม มีส่วนช่วยให้อุณหภูมิกระจายตัวได้สม่ำเสมอขึ้น [2, 3]

CST-325

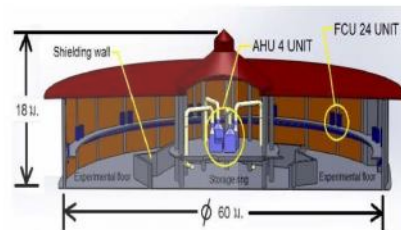
งานวิจัยนี้นำเสนอผลพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศ ภายในอาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และห้องโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน การศึกษาใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ซีเอฟดี (CFD) เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของอากาศ ผลที่ได้จะถูกนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ นำไปสู่แนวทางการปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศที่ให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

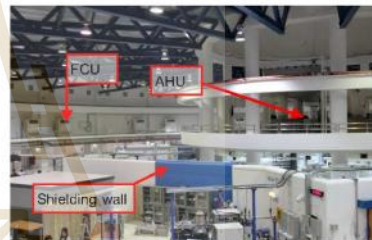
อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์เป็นห้องโถงปรับอากาศขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่กว่า 2,800 ตารางเมตร เป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เมตร สูง 18 เมตร พื้นที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ส่วนทำความเย็นวงรอบนอก ประกอบด้วย Fan Coil Unit (FCU) จำนวน 24 ชุด ติดตั้งอยู่รอบตัวอาคารภายใน ใช้ปรับอากาศให้กับบริเวณโถงทดลอง โดยลักษณะของ FCU ที่ใช้จะมีช่องจ่ายลมอยู่ด้านบน และช่องกลับอากาศอยู่ด้านล่างภายในตัวเดียวกัน (ดูรูปที่ 4) และ (2) ส่วนทำความเย็นวงรอบใน ประกอบด้วย Air Handling Unit (AHU) จำนวน 4 ตัว ติดตั้งอยู่บนชั้นลอยที่บริเวณกลางตัวอาคาร ใช้การปรับอากาศให้กับบริเวณวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ โดย AHU จะจ่ายอากาศไปตามท่อส่ง ช่องกลับอากาศที่อยู่ด้านล่าง และช่องเติมอากาศใหม่ที่ด้านข้าง (ดูรูปที่ 5) โดยโซนโถงทดลองและโซนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ถูกแบ่งจากกันด้วยกำแพงกันรังสี (Shielding wall) ที่มีลักษณะเป็นรูปดาวแปด ดังแสดงในรูปที่ 2

ปัจจุบัน อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโถงทดลอง ประกอบด้วยท่อสุญญากาศที่ใช้กักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็กไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน สถานีวิจัยและทดลอง ตลอดจนอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์จำนวนหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3 อุปกรณ์เหล่านี้มีความเป็นจริงส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศ

ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเบื้องต้นของงานวิจัยนี้สนใจพฤติกรรมการไหลโดยภาพรวม ดังนั้นจึงได้ตัดอุปกรณ์ปลีกย่อยออกจากการจำลองผล โดยเลือกทำการจำลองพฤติกรรมการไหลเฉพาะส่วนที่เกิดผลกระทบจากระบบทำความเย็นหลัก คือ จาก FCU จำนวน 24 ตัว และจาก AHU จำนวน 4 ตัว



รูปที่ 2 อาคารวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์และโถงทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน

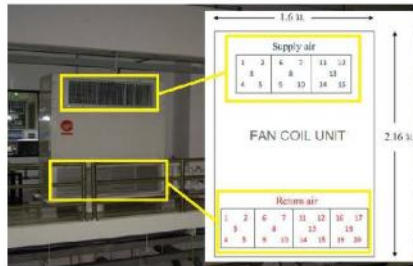


รูปที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์ภายในตัวอาคาร

2.1 การวัดและเก็บข้อมูล

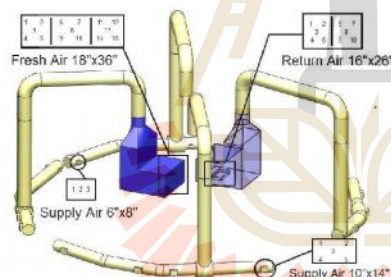
การดำเนินการเริ่มจากการตรวจวัดความเร็วมวลอากาศที่ช่องจ่ายอากาศขนาด $14 \times 46 \text{ in}^2$ และที่ช่องกลับอากาศขนาด $16 \times 56 \text{ in}^2$ ของ FCU ทั้ง 24 ตัว การวัดอิงตามมาตรฐาน ANSI/ASHRAE 41.2-1987 (RA 92) (ASHREA, 1992) [4] โดยแต่ละช่องได้ทำการตรวจวัดทั้งหมด 15 และ 20 จุด ผลการวัดได้ค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่ช่องจ่ายอากาศเท่ากับ 3.7 m/s และความเร็วลมเฉลี่ยที่ช่องกลับอากาศเท่ากับ 1.9 m/s ตำแหน่งการตรวจวัดความเร็วลมที่ช่อง FCU แสดงในรูปที่ 4

CST-325



รูปที่ 4 ตำแหน่งตรวจวัดความเร็วลมของ FCU

สำหรับ AHU ทั้ง 4 ตัว ได้ทำการวัดความเร็วลมที่ช่องจ่ายอากาศทั้ง 25 ช่อง คือขนาด 6x8 in² จำนวน 11 ช่อง และขนาด 10x14 in² จำนวน 14 ช่อง โดยวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยได้ 5.9 m/s และ 6.2 m/s ตามลำดับ ส่วนช่องกลับอากาศซึ่งมีทั้งหมด 4 ช่อง ขนาด 16x26 in² วัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยได้ 3.3 m/s และช่องเติมอากาศใหม่ขนาด 18x36 in² จำนวน 4 ช่อง วัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยได้ 3.3 m/s ดังแสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งตรวจวัดความเร็วลมของ AHU

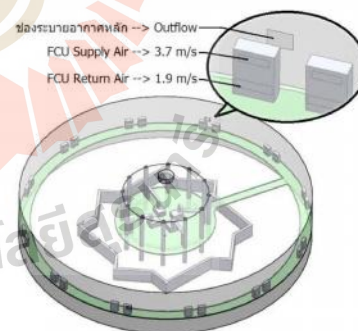
ตารางที่ 1 ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ได้จากการตรวจวัดจริง กับค่าจากการออกแบบของระบบปรับอากาศในตึกอาคารและโรงทดลอง พบว่าค่าจากการตรวจวัดจริงเกือบทุกจุดมีค่าแตกต่างจากค่าการออกแบบเดิม สาเหตุอาจเป็นเพราะสมรรถนะของอุปกรณ์และระบบที่ลดลงตามอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การจำลองผลในนี้ก็จะใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

ตำแหน่งการวัด	อัตราการไหล (CFM)	
	ค่าการออกแบบ	ค่าเฉลี่ยการตรวจวัด
FCU Supply Air (14"x46")	4,300	3,227
FCU Return Air (16"x56")	4,000	2,344
AHU Supply Air (6"x8")	400	386
AHU Supply Air (10"x14")	1,200	1,185
AHU Return Air (16"x26")	1,200	1,877
AHU Fresh Air (18"x36")	3,600	2,951

ตารางที่ 1 ข้อมูลความเร็วอากาศจากการตรวจวัดจริงเทียบกับข้อมูลตามค่าการออกแบบเดิม

2.2 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

แบบจำลองตัวอาคาร ห้องโถง รวมถึงอุปกรณ์ลำเลียงและจ่ายอากาศ ถูกเขียนขึ้นตามสเกลเท่าขนาดจริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการจ่ายอากาศสำหรับ FCU กำหนดให้ความเร็วลมที่ช่องจ่ายอากาศและช่องกลับอากาศ เท่ากับ 3.7 และ 1.9 m/s ตามลำดับ สำหรับ AHU กำหนดให้ความเร็วลมที่ช่องจ่ายอากาศขนาด 6x8 in² และ 10x14 in² มีค่าเท่ากับ 5.9 และ 6.2 m/s ตามลำดับ ส่วนช่องกลับอากาศและช่องเติมอากาศใหม่มีความเร็วลมเท่ากับ 3.3 m/s เท่ากันทั้งคู่ นอกจากนี้ตัวอาคารยังมีช่องระบายอากาศหลัก (Exhaust Air) ซึ่งจะถูกกำหนดเงื่อนไขเป็นแบบ Outflow และที่ผนังอาคารกำหนดให้เป็นสภาพการไม่ลื่นไหล (No-slip condition) ดังแสดงในรูปที่ 6

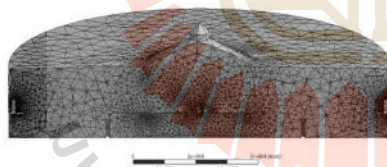


รูปที่ 6 ตำแหน่งช่องระบายอากาศหลัก

CAST-325

การจำลองพฤติกรรมการไหลเวียนอากาศใช้วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLUENT เวอร์ชัน 12 ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขบนพื้นฐานระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่ม จากลักษณะของห้องโถงที่มีขนาดใหญ่และอากาศภายในโดยมากมีความเร็วต่ำจึงกำหนดให้การจำลองผลอยู่บนสมมติฐานการไหลแบบราบเรียบและอัดตัวไม่ได้ โดยในเบื้องต้นนี้ยังไม่พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิซึ่งจะได้ทำการศึกษาในลำดับต่อไปของงานวิจัย

การจำลองคอมพิวเตอร์ใช้กริดแบบ Tetrahedral เพราะรูปทรงของปัญหาที่วิเคราะห์มีความซับซ้อน โดยเริ่มจากการทดสอบความเป็นอิสระของกริดที่จะใช้ในการคำนวณ ที่มีความละเอียดแตกต่างกัน 3 ชุด ได้แก่ ชุด 149,342 ชุด 560,507 และชุด 737,423 จากการทดสอบพบว่ากริดชุดที่มีความละเอียดขนาด 560,507 และ 737,423 ให้ผลที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดชุด 560,507 ในการคำนวณ รูปที่ 7 แสดงลักษณะกริดที่ใช้ จะเห็นได้ว่ากริดถูกสร้างอย่างหนาแน่นบริเวณ FCU, AHU, บริเวณช่องระบายอากาศหลัก และบริเวณวงรอบในของตัวอาคาร เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์หลักซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหล และเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 7 ลักษณะกริดที่ใช้ในการจำลองผล

3. ผลการจำลองและการวิเคราะห์

ผลการจำลองแสดงในรูปคอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 3 ระดับ ได้แก่ ระนาบ 1.2 m ซึ่งเป็นตำแหน่งความสูงที่ติดตั้งวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ (รูปที่ 8) ระนาบ 3.6 m ซึ่งเป็นตำแหน่งความสูงที่ติดตั้งหัวจ่ายของท่อส่งอากาศที่ต่อมาจาก AHU (รูปที่ 9) และระนาบ 6.0 m ซึ่งเป็นตำแหน่งของหน้าตัดช่อง

จ่ายอากาศของ FCU (รูปที่ 10) เพื่อให้เห็นการกระจายอากาศบนแต่ละระนาบที่สำคัญ นอกจากนี้ยังแสดงผลในรูปเส้นการไหลของอากาศที่ออกจากช่องจ่ายอากาศของ FCU และ AHU (รูปที่ 12 และ 13) เพื่อให้เห็นพฤติกรรมกระจายของอากาศใน 3 มิติ จากรูปที่ 8 แสดงการกระจายความเร็วลมที่ระนาบเดียวกับหัวจ่าย FCU (ความสูง 6 m จากพื้นอาคาร) ผลที่ได้พบว่า FCU ซึ่งถูกติดตั้งไว้รอบตัวอาคารสามารถส่งแรงลมไปได้จนถึงโซนด้านในบริเวณที่ติดตั้งวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ได้ ระดับความเร็วลมบริเวณวงแหวนอยู่ในช่วง 0.25-1.5 m/s แต่สำหรับบริเวณที่ FCU ตั้งอยู่ใกล้กับช่องระบายอากาศหลักพบว่าความเร็วลมที่ช่องจ่ายอากาศของ FCU ไม่สามารถส่งแรงลมไปได้จนถึงโซนของวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ เพราะอากาศถูกเหนี่ยวมาจากช่องทางออกหลักจนสูญเสียความเร็วไป

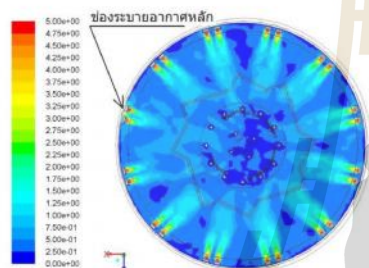
สำหรับที่ระนาบความสูง 3.6 m จากระดับพื้นอาคาร ซึ่งเป็นระนาบเดียวกับหน้าตัดหัวจ่ายอากาศของท่อสำเลียงที่ต่อกับ AHU พบว่าแรงลมจากหัวจ่ายขับดันให้อากาศไหลเป็นลำพุ่งออกไปสู่บริเวณโซนกำแพงกันรังสี และยังเหนี่ยวนำให้อากาศโซนด้านในพุ่งออกไปสู่บริเวณด้านนอกด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่าหัวจ่ายอากาศไม่สามารถกระจายอากาศให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอได้ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิแวดล้อมรอบวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 9

การกระจายความเร็วของอากาศที่ระนาบเดียวกับท่อสำเลียงอิเล็กทรอนิกส์ (ระดับความสูง 1.2 m จากพื้น) แสดงในรูปที่ 10 พบว่าบริเวณภายในกำแพงกันรังสีความเร็วลมกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.3 – 1.0 m/s ส่วนบริเวณภายนอกกำแพงความเร็วลมมีค่าไม่เกิน 0.4 m/s โดยมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วบริเวณ

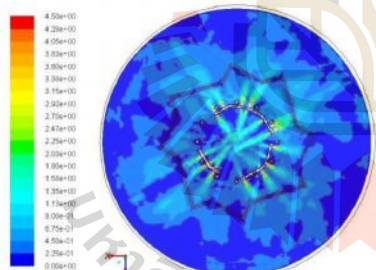
สำหรับภาพรวมของการกระจายความเร็วที่หน้าตัดกึ่งกลางตัวอาคารในแนวตั้ง ที่ลากผ่านแนวของหัวจ่ายอากาศของ FCU ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้าง และของ AHU ซึ่งติดตั้งอยู่โซนตรงกลางตัวอาคาร แสดงในรูปที่ 11 พบว่าอากาศกระจายจากหัวจ่ายของ FCU ทาง

CST-325

ด้านข้างเข้าสู่โซนกลางโดยมีแนวโน้มพุ่งกระจายขึ้นด้านบน ส่วนอากาศที่ถูกจ่ายจากหัวจ่ายของท่อส่ง AHU มีแนวโน้มกระจายตัวลงด้านล่างและอยู่ภายในโซนวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ โดยจากรูปพบโซนอับลมที่บริเวณด้านบน ซึ่งอาจเป็นเพราะกระแสลมถูกกันไว้ด้วยผนังกันรังสี กระแสลมจากหัวจ่ายด้านบนจึงส่งออกมาได้น้อย ในขณะที่เดียวกันหัวจ่ายจาก FCU ที่อยู่ด้านบนก็ติดตั้งอยู่สูงเกินไปจนกระแสลมถูกส่งข้ามโซนดังกล่าวไป



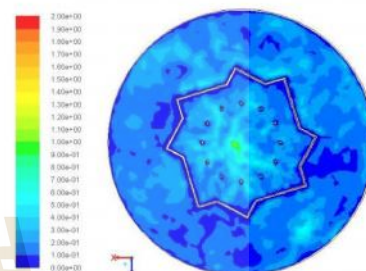
รูปที่ 8 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 6 m จากพื้นอาคาร (ระนาบช่องจ่ายอากาศของ FCU)



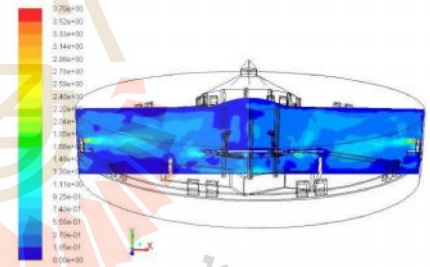
รูปที่ 9 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 3.6 m จากพื้นอาคาร (ระนาบหัวจ่ายอากาศของท่อส่ง AHU)

รูปที่ 12 และ 13 แสดงเส้นความเร็วการไหลของอากาศที่ออกจากช่องจ่ายอากาศของ FCU และจากหัวจ่ายอากาศของท่อส่ง AHU จะเห็นว่าอากาศไหลเข้าสู่โซนกลางของตัวอาคาร แต่จะมีการหมุนตัวกลับก่อนที่จะถึงตำแหน่งกึ่งกลางอาคาร ส่วนเส้นความเร็วการไหลที่ออกจาก FCU ตัวที่อยู่ใกล้ช่องระบาย

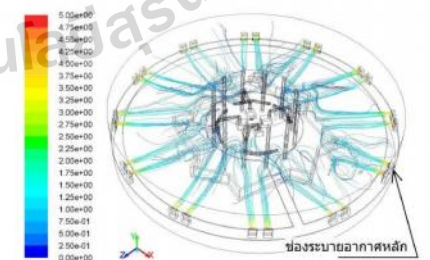
อากาศหลัก พบว่าการไหลถูกเหนี่ยวนำให้หมุนตัวกลับเข้าสู่ช่องระบายอากาศหลัก สำหรับเส้นความเร็วการไหลของอากาศที่ออกจากหัวจ่ายของท่อส่ง AHU พบว่า สามารถที่จะส่งความเร็วลมออกนอกบริเวณวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ไปสู่โถงทดลองได้ แต่การกระจายตัวของความเร็วไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหัวจ่ายของท่อส่งถูกติดตั้งอย่างไม่เหมาะสม



รูปที่ 10 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบความสูง 1.2 m จากพื้นอาคาร (ระนาบที่ติดตั้งวงแหวนกักเก็บ)

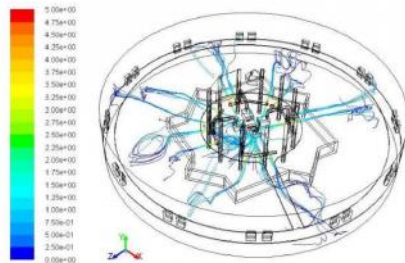


รูปที่ 11 คอนทัวร์ความเร็วของระนาบหน้าตัดแนวตั้ง



รูปที่ 12 เส้นการไหลจากช่องจ่ายอากาศของ FCU

CST-325



รูปที่ 13 เส้นการไหลจากหัวจ่ายอากาศของ AHU

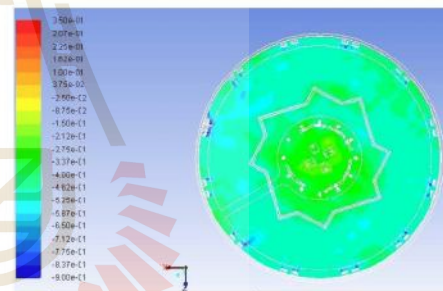
การกระจายความดันที่ระนาบความสูง 6 m, 3.6 m และ 1.2 m ซึ่งเป็นความสูงระนาบเดียวกับช่องจ่ายอากาศของ FCU หัวจ่ายอากาศของห้อง AHU และวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ แสดงในรูปที่ 14 ถึง 16 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าที่ระดับความสูง 6 m ความดันมีค่าสูงบริเวณโซนกลางห้องโถง แสดงว่าบริเวณดังกล่าวอากาศมีความเร็วต่ำ เนื่องจากแรงลมที่ส่งออกจากช่องจ่ายอากาศของ FCU ไปไม่ถึง การกระจายความดันค่อนข้างสม่ำเสมอที่ระนาบความสูง 3.6 m เพราะมีหัวจ่ายอากาศของห้อง AHU ที่ติดตั้งบริเวณกลางห้องที่ช่วยในการไหลเวียนของอากาศ สำหรับที่ระดับความสูง 1.2 m พบว่าการกระจายความดันแบ่งเป็นสองโซน คือโซนที่มีความดันสูงอยู่บริเวณภายใน และโซนที่มีความดันต่ำกว่าอยู่รอบนอก เป็นผลมาจากอากาศที่ส่งจากหัวจ่ายของห้องของ AHU ถูกขวางไว้โดยผนังกันรังสี ในขณะที่อากาศที่ถูกส่งออกจากช่องจ่ายอากาศของ FCU ที่ติดตั้งไว้ที่ระดับความสูง 6 m พังกระจายข้ามโซนรอบนอกไป ซึ่งสอดคล้องกับผลความเร็วที่ได้ตามรูปที่ 10 และ 11

4. สรุป

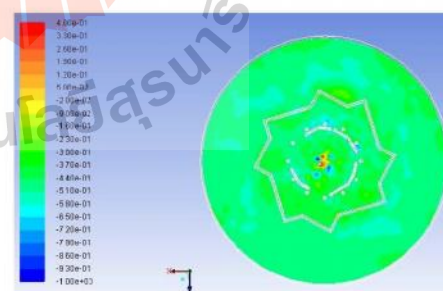
งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของอากาศที่ออกจากชุด FCU ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณรอบตัวอาคาร การศึกษาสนใจผลกระทบของกระแสอากาศที่กระจายเข้าไปในโซนด้านในบริเวณห้องโถงทดสอบ และบริเวณวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ การวิจัยใช้การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ จากการศึกษาพบว่าความเร็วอากาศที่ถูกส่งออกจากช่องทางออกของ

FCU มีการกระจายเข้าสู่โซนด้านใน แต่การกระจายเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศไม่เพียงเฉพาะบริเวณโถงทดลองเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อบริเวณวงแหวนกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ด้วย นอกจากนี้ ตำแหน่งติดตั้งช่องระบายอากาศหลัก ยังส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ออกจาก FCU ที่ติดตั้งอยู่ใกล้กับช่องระบายอากาศหลักเช่นเดียวกัน กล่าวคือ จะทำให้กระแสอากาศเกิดการหมุนตัวกลับบางส่วน ปริมาณที่ส่งเข้าสู่ส่วนด้านในจึงลดลงในบริเวณดังกล่าว

ผลการศึกษาจะถูกนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิในตัวอาคาร ผลของการไหลในแบบปั่นป่วน ซึ่งจะนำไปสู่การหาแนวทางปรับปรุงระบบไหลเวียนอากาศ และการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอมากขึ้น ช่วยให้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของแสงซินโครตรอนดีขึ้น

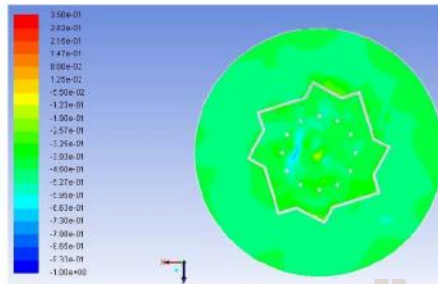


รูปที่ 14 การกระจายความดันที่ระนาบความสูง 6 m



รูปที่ 15 การกระจายความดันที่ระนาบความสูง 3.6 m

CST-325



รูปที่ 16 การกระจายความดันที่ระนาบความสูง 1.2 m

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนสถานที่เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษาและการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานประจำปี สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). 2554, สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา
- [2] Chang J.C., Tsai Z.D., Liu C.Y., Chug Y.C., Ueng T.S., Chen J.R., "Numerical simulation of the air conditioning system design for the 3GeV TPS storage ring," Particle and Accelerator Conference (PAC), 2009, Vancouver, Canada.
- [3] Chang J.C., Tsai Z.D., Liu C.Y., Chug Y.C., Chen J.R., Ke M.T., "Numerical simulation and air conditioning system study for the storage ring of TLS," Particle and Accelerator Conference (PAC), 2010, Tokyo, Japan.
- [4] ASHRAE. (1992). Standard 41.2-1987 (RA 92), Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineer, Inc.

Verification and CFD Modeling of Airflow and Temperature Distribution in Enclosed Space

Krerkrit Sittisard¹, Keerati Suluksna^{2*}, Preecha Wanwong³ and Pongwat Wichaimaung⁴

¹Synchrotron Light Research Institute(Public Organization)

111 University Ave, T.Suranaree, A.Muang, Nakhonratchasima 30000

²School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology

111 University Ave, T.Suranaree, A.Muang, Nakhonratchasima 30000

*Contact: Email: keerati@sut.ac.th, Tel. +6644-224-235, Fax +6644-224-613

Abstract

The purpose of this modeling of air-conditioning system in Siamphoton Laboratory Building (Nakhonratchasima, Thailand) creates to study airflow patterns and temperature distributions. Both airflow patterns and temperature distributions are important information for understanding in performance of ventilation system. In the above experiments have been investigated by using three dimensional CFD simulation and the results from simulation are compared with experiment data. Three of types in flow modeling simulation are applied to calculate air flow patterns and temperatures. Calculations are compared with both experiments and the results of standard k-epsilon($k-\epsilon$), k-omega($k-\omega$) and Laminar model, respectively. All simulation results are valuable references for design and analysis of air-conditioning system of Storage ring and Experimental hall building (Synchrotron light Research Institute (Public Organization)).

Keyword: Synchrotron light, Storage ring, CFD, Measurement, Verification

1. Introduction

Studying about factors which influence the position deviation of the electron beam from synchrotron radiation light source found that the temperature variation in the building is one cause of the factors [1]Chen J.R. et al.(2002). The temperature variation is affecting to the incorrect position of the electron beam. Therefore, CFD is used for predicting the behavior of air flow distribution in a building [2]Chang J.C. et al.(2007) to describe the impact of such factors. This research studies the modeling of air-conditioning system of the storage ring building (Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima) by creating the modeling of air-

conditioning system which has equipments similar to the air-conditioning system of the storage ring building then using experiment data compares with the results from three of standard types in flow modeling simulation by using computer.

From studying in experiment about flow pattern and velocity in an enclosed space by using 3D CFD simulation which is compared with experiment data found that k-epsilon and k-omega models closer with the results of velocity and temperature distributions when comparing to Reynolds stress model [3]J.Sarkar and S.Mandal (2008). The SST k-omega based model is applied to calculate airflow velocities and temperatures in a model office room. Calculations

CST010

are compared with both experiments and the results of the standard k -epsilon, the RNG k -epsilon model and the laminar model, respectively. The computations result found the SST k -omega based models how the best agreement with measurements [4]A. Stamou and I. Katsiris(2005).

The simulation by using computer will use CFD software Fluent Program (version 14) for predicting the air distribution, in addition, using 3 different kinds of flow patterns which consist of Laminar model, Standard k -epsilon(k - ϵ) model and SST k -omega(k - ω) model will illustrate the flow model which can predict the flow behavior as closely as possible to the measured data. The possible flow model is used for predicting the flow behavior in the storage ring building.

2. Experimental study

The model which created is a rectangular box by making from Acrylic in size of 800x1,000x600 mm (Length x width x height) includes 1.) 1 channel of 18 mm diameters Air inlet. 2.) 1 channel of Air outlet with 75 mm exhaust fan. 3.) Fan coil Unit (FCU) in size of 55x140x190mm which includes the air supply, air return and fresh air inlet, equipped with double 12V., 40 mm of diameters suction fan, and a 200 Watt of heater for increasing the temperature of the system. 4.) Air Handling Unit (AHU) in size of 102x150x150mm includes the inlet and outlet air with a fan and heater as the FCU. And the last one, 5.) The 5mm thickness acrylic plate in size of 150x800mm is modeled as a side wall like a shielding wall in the storage ring building. By locating and sizing as shown in figure 1.

Measuring the air velocity and temperature do in a constant temperature of 25°C room, and

increase the voltage supplied to the FCU and AHU fan to 15 Volt when higher speed in order to see the differences more clearly. The velocities and temperatures at the central plane of the model measure in 3 different altitude levels; a height of 60, 130 and 355 mm, respectively (Figure 2,3) and the measurement data are compared with the simulation results.

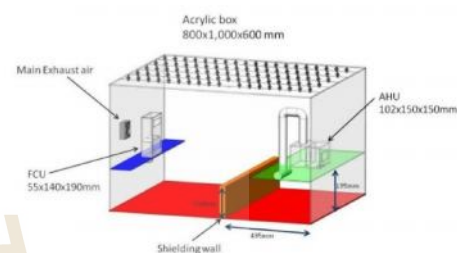


Figure 1: The Acrylic model room

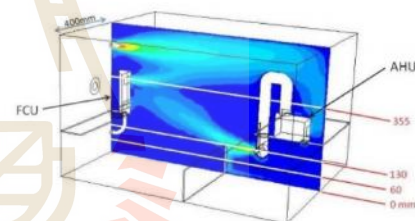


Figure 2: Central Plane and 3 Different levels for get data



Figure 3: Velocity and temperature measurements

CST010

The instrument for measuring is a Hot wire type, brand FESTO Model 435 Series(Figure 4), a temperature measuring range is -20 to $+70$ °C (accuracy ± 0.3 °C) and speed range is 0 to 20 m/s (accuracy ± 0.03 m/s).



Figure 4: Hot wire type measurement instrument

3. CFD Simulation

The airflow simulation uses computational fluid dynamics (CFD) method by using the commercial software FLUENT version 14 which is the numerical method base on the finite volume. The CFD simulation uses in three different types of flow models: 1. laminar flow. 2. turbulent flow standard k-epsilon($k-\epsilon$), and 3. turbulent SST k-omega($k-\omega$) in order to demonstrate the flow model which can predict the flow behavior are close to the measurement results. For boundary condition, the velocity and temperature of various inlets and outlets air has been measured and entering into the computer simulations as follows in figure 5. By specify:

- Fan Power supplied 15 Volt
- Main Fresh-air inlet: Pressure inlet 298 °K
- Main Exhaust-air outlet: -1.16 m/s, 304°K
- FCU Supply: 1.4 m/s, 307.5°K
- FCU Return: -0.55 m/s, 303°K
- AHU Supply: 2.8 m/s, 305°K
- AHU Return: -0.52 m/s, 303°K
- AHU Fresh air: -0.7 m/s, 303.5°K

And the walls of all models are determined to the Isothermal conditions which are constant temperature of 25°C .

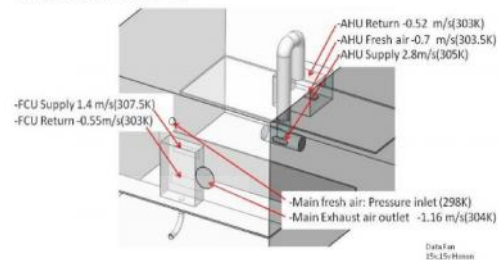


Figure 5: Boundary Condition have been used in CFD

The computer simulation uses Tetrahedral grids. First, test the independence of grid with the resolution of 4 different sets: 1.) 151,683 2.) 424,377 3.) 641,093 and 4.) 826,679 respectively before calculation. From testing found that the four sets of grids are tendency in the same direction. Although it would be different, it was different only during low speed. Therefore, calculation uses a 641,093 grid resolution for convenience and appropriate in using computer resources. Figure7 shows the grid to be used: It found that the grid was created massively in the air inlet and outlet. Because these areas are the main positions which are affected from the flow behaviors.

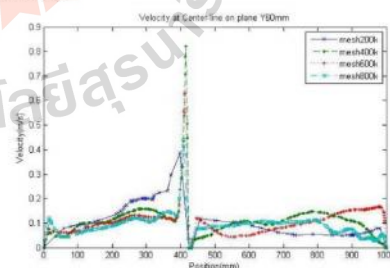


Figure 6: Velocity on 60 mm height of central plane for testing the independence of grid

4. Result and discussion

The results of simulations compare the air velocities and temperatures on the central-plane at 3 levels: 60 mm., 130 mm. and 355mm. which are the high-level positions matching with the supply air channels from AHU and FCU respectively.

Figure 7 shows the variations of velocities on the central plane at the high level of 60 mm. The result from CFD simulation by using the SST k- ω ($k-\omega$) of turbulent flow model was close as measurement data rather than the result from the laminar and k- ϵ ($k-\epsilon$) flow model.

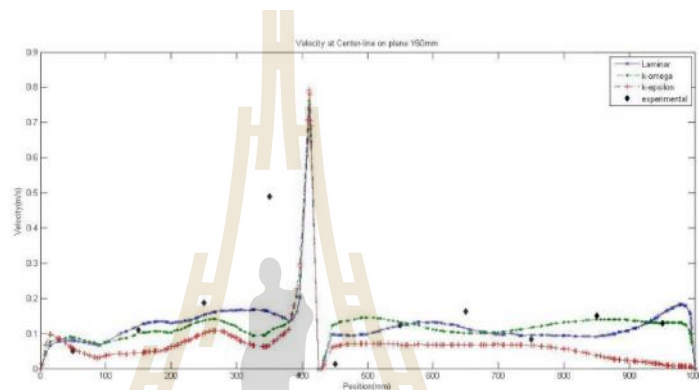


Figure7: Velocity variation on the central plane at 60 mm high-level

Figure8 shows the variations of velocities on the central plane at the high level of 130 mm. It found that CFD simulations from all flow models had the similar results. Moreover, the result from the measurement in the low speed range was consistent. But the result at the air outlet of AHU which was the high speed range was very different from the low speed range.

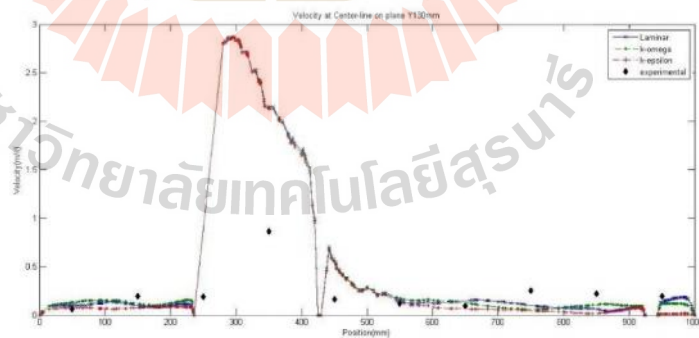


Figure8: Velocity variation on the central plane at 130 mm high-level

Figure9 shows the variations of velocities on the central plane at the high level of 355 mm. The results from all flow patterns of the simulation were similar. But the SST k-omega($k-\omega$) turbulence flow was better result. However, comparisons between the results from the simulation and the results from the measurements were consistent.

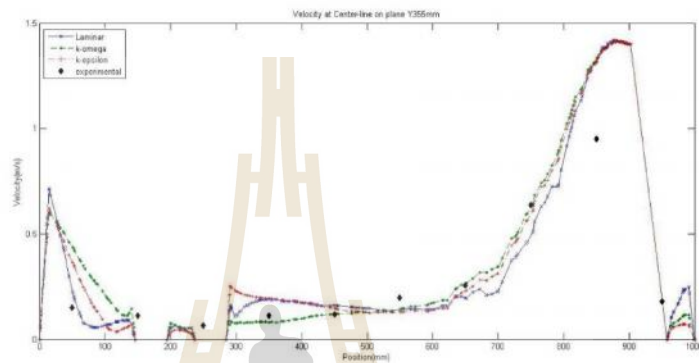


Figure9: Velocity variation on the central plane at 355 mm high-level

The comparison of temperature on the centerline plane at the high level of 60mm (Figure10) found that the result from CFD simulation by using the standard k-epsilon($k-\epsilon$) of turbulent flow model was close as measurement data rather than the result from the laminar and SST k-omega($k-\omega$) flow model.

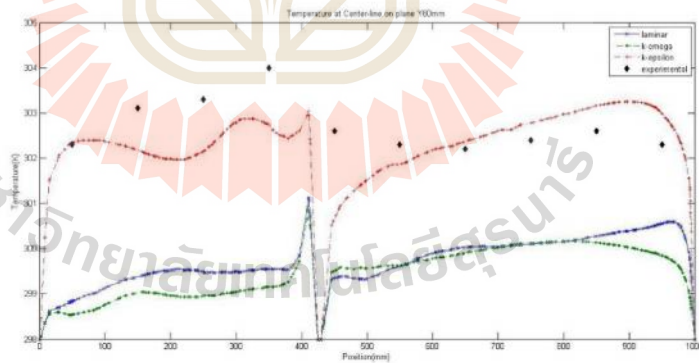


Figure10: Temperature variation on the central plane at 60 mm high-level

Figure11 shows the variations of temperatures on the central plane at the high level of 130mm. The laminar and turbulent flow models as the CFD simulation result. But the result from the k-epsilon($k-\epsilon$) model was different and it was better when comparing with the measurement results.

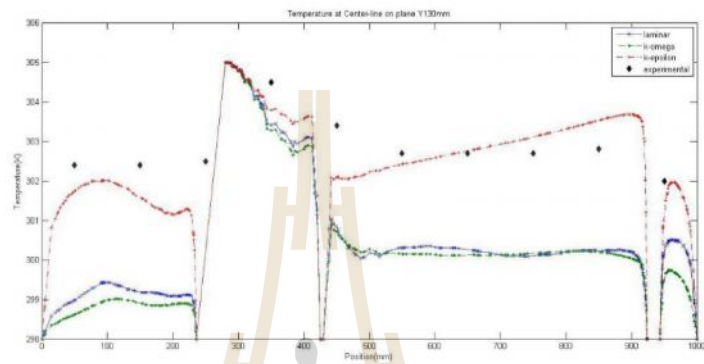


Figure11: Temperature variation on the central plane at 130 mm high-level

Figure12 shows the variations of temperatures on the central plane at the high level of 355mm found that the result as at the high level of 130mm. Although the simulation results by using the k-epsilon($k-\epsilon$) was different from the laminar and SST k-omega($k-\omega$) models, the result of k-epsilon($k-\epsilon$) when comparing with measurements data was very consistent.

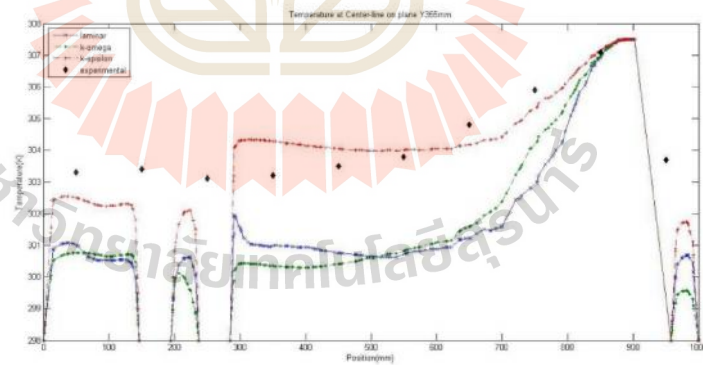


Figure12: Temperature variation on the central plane at 355 mm high-level

5. Conclusions

This research studies the modeling of air conditioning system of the storage ring building (Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima) by using CFD method for predicting the behavior of air flow distribution by using 3 difference kinds of flow patterns which consist of Laminar model, Standard k-epsilon($k-\epsilon$) model and SST k-omega($k-\omega$) model respectively then compares with measured results. From studying found that SST k-omega($k-\omega$) turbulence model was consistent as measurement results rather than the standard turbulence k-epsilon($k-\epsilon$) and laminar. Moreover, the comparison of temperature found the standard k-epsilon($k-\epsilon$) was consistent as the measurement result rather than the laminar and SST k-omega($k-\omega$) model.

All results of research are applied to study about the air distribution in the storage ring building. This will be leading to improve air circulation and more uniform temperature distribution.

6. Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude for supporting and funding from Suranaree University of Technology (SUT) and Synchrotron Light Research Institute (SLRI).

7. References

[1] Chen J.R., Wang D.J., Tsai Z.D., Kuan C.K., Ho S.C., and Chang J.C., Mechanical Stability Studies at the Taiwan Light Source, *International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation*

Equipment and Instrumentation (MEDSI 02), 2002, Illinois, USA

[2] Chang J.C., Tsai Z.D., Liu C.Y., Chug Y.C., Chen J.R., Ke M.T., Numerical simulation and air conditioning system study for the storage ring of TLS, *Particle and Accelerator Conference (PAC)*, 2010, Tokyo, Japan.

[3] Sarkar J., and Mandal S., CFD Modeling and validation of temperature and flow distribution in air conditioned space, *International Refrigeration and Air Conditioning*, 2008, Purdue, USA.

[4] A.Stamou and I.Katsiris. Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer, *Building and Environment*, vol.41, 2006, P.1171–1181.

ประวัติผู้เขียน

นายเกริกฤทธิ์ สิทธิศาสตร์ เกิดเมื่อวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2525 จังหวัดร้อยเอ็ด ศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเมืองร้อยเอ็ด ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย ศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปฏิบัติงานสหกิจศึกษาที่ บริษัทไทย ชัมมิท ออโต้พาร์ทจำกัด จ.สมุทรปราการ หลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2547 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นระยะเวลา 1 ปี จากนั้นได้เข้าทำงานที่ บริษัท แมกนีคอมพรีชีชั่นเทคโนโลยี จำกัด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตำแหน่ง Implement Engineer บริษัทเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ เป็นเวลา 6 เดือน และจากนั้นในปี 2549 ได้เข้าทำงานที่ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล สังกัดส่วนงานพัฒนาระบบเชิงกล หน้าทีรับผิวดอกแบบ ประกอบทดสอบ ติดตั้ง อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบลำแสงแสงและเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งได้ใช้ความรู้ทางวิศวกรรมที่ได้ศึกษามาอย่างเต็มที่ จนในปี 2555 ได้รับทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจึงลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล โดยได้เลือกเรียนทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(Computational Fluid Dynamic; CFD) เพื่อนำความรู้ไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อสถาบันฯ