



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

ปริญญา

วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ Neutral Grounding Resistor ของ
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A Study of Temperature Distribution inside The Neutral Grounding Resistor Cabinet
of Provincial Electricity Authority of Thailand

นามผู้วิจัย นางสาวชนาลัย จรุงเพ็ญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อภิชาติ แจ่มบำรุง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เกียรติคุณ กวีญาณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ณัฐศักดิ์ บุญมี, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์สุรชัย รดาการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ Neutral Grounding Resistor
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A Study of Temperature Distribution inside The Neutral Grounding Resistor Cabinet
of Provincial Electricity Authority of Thailand

โดย

นางสาวชนาลัย จรุงเพ็ญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย)

พ.ศ. 2551

ชนาลัย จรูญเพ็ญ 2551: การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ Neutral Grounding Resistor ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมป้องกัน อักคิภัย) สาขาวิศวกรรมป้องกันอักคิภัย โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อภิชาติ แจ่มบำรุง, Ph.D. 102 หน้า

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.)ได้นำ Neutral Grounding Resistor (NGR) มาติดตั้งใช้งานใน สถานีไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) แต่จากการใช้งาน กลับพบปัญหาเกิดขั้วรถลูกไหม้ภายในตู้ในหลายสถานีฯ สาเหตุ เบื้องต้นคาดว่าเกิดจากกระแสไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน อันเนื่องมาจากเกิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) หรืออาจเกิดจากกระแสไหลไม่ สมดุล (Unbalanced Current) ทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตู้ประกอบกับการระบายอากาศในตู้ที่ไม่ เพียงพอ ดังนั้นเมื่อมีความร้อนสะสมจนเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ เช่น สายไฟ, ปลั๊กไฟ จะทนได้จึงเกิดการหลอมละลายและบิตงอ

งานวิจัยนี้ขึ้นต้นได้ศึกษาถึงการร้อนขึ้นของ Neutral Grounding Resistor (NGR) อัน เนื่องมาจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน NGR ลงดินอย่างต่อเนื่อง โดยได้ทำการทดลองจ่ายกระแส ผ่านตัว NGR ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของ NGR จะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับกระแสที่จ่ายให้ โดยที่ถ้าจ่ายกระแส 25 แอมป์ผ่าน NGR อย่างต่อเนื่อง พบว่า อุณหภูมิของ NGR จะมีค่าเป็น 60.9 องศาเซลเซียสภายในเวลา ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้มาศึกษาการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิ ของอากาศภายในตู้ NGR ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข พบว่าที่อุณหภูมิของ NGR 60.9 องศาเซลเซียส จะ ทำให้อุณหภูมิที่ผิวด้านบนของตู้สูงขึ้นเป็น 52 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การจำลองจะพิจารณาผลจากการ ถ่ายเทความร้อนจาก NGR ไปยังอากาศโดยรอบเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คิดผลจากผนังของตู้ที่ได้รับความ ร้อนจากดวงอาทิตย์อันเนื่องมาจากการที่ตู้ NGR ต้องตั้งอยู่กลางแจ้ง ซึ่งถ้าเมื่อรวมผลของการถ่ายเท ความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังผนังตู้ ยิ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวด้านบนของตู้สูงขึ้น จนเกินพิกัดของฉนวน สายไฟฟ้าแรงต่ำและอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ที่จะทนไหว จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเกิดการหลอม ละลาย จนเป็นสาเหตุให้เกิดการลุกไหม้ตามมาได้ การศึกษานี้ยังได้นำเสนอการปรับปรุงการระบาย ความร้อน โดยเพิ่มการติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดเล็กที่ด้านข้างของตู้ ซึ่งจากผลการจำลองพบว่า สามารถทำให้อุณหภูมิที่ผิวบนของตู้มีค่าลดลงอย่างพอเพียงที่จะ ไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์

Chanalai Jaroonpen 2008: A Study of Temperature Distribution inside The Neutral Grounding Resistor Cabinet of Provincial Electricity Authority of Thailand. Master of Engineering (Fire Protection Engineering), Major Field: Fire Protection Engineering, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Mr. Apichart Changbamrung, Ph.D. 102 pages.

The Provincial Electricity Authority (PEA, Thailand) has been installed Neutral Grounding Resistor (NGR) at substation which located in the industrial zone for reducing voltage dip problem. There found that NGRs and devices inside the cabinet were damaged because of fire in many substations. The causing of high impedance fault or unbalance current was continuously flowing through NGR that effected to the rising of the temperature of NGRs inside the cabinet. According to the less ventilation system, temperature of air inside the cabinet was high due to heat collecting that will make some of the low voltage power cable and accessories in the cabinet were damaged by melting or deterioration of their insulation.

This research wants to study of heat rising inside the cabinet of Neutral Grounding Resistor (NGR) because of high impedance fault or unbalance current continuously fed through the earthing system via NGR. So the test was followed by 25 ampere, electric current was continuously fed to NGR in order to find out the relationship between current and temperature of NGR. After the test, we found that the temperature of NGR was 60.9°C within 1 hour after supplying 25 ampere. This result was used to set in the flow simulation model. Simulation's results found that the maximum temperature of air at the top of the cabinet was 52°C when NGR's temperature was set at 60.9°C. The maximum temperature inside cabinet will increase if the effect of radiation from the sun is added. So that will be causing the ignition of fire and the deterioration of many devices inside the NGR cabinet. In order to improve air ventilation for the NGR cabinet, the ventilation fan is suggested. From the improved model with fan, the result show that the maximum at the top cover of the cabinet was reduced enough to prevent damage of devices and NGR in the cabinet.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.อภิชาติ แจ่มบำรุง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนะอย่างดียิ่งในแนวทางการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์ รวมถึง อ.ดร. ณัฐศักดิ์ บุญมี รศ.ดร.เกียรติยุทธ กวีญาณ รศ.ดร.เสรี เสวตเศรษฐี และรศ.ดร. สุรชัย รดาการ ประธานสาขาภาควิชา โครงการวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำชี้แนะในการจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณจุมพล ศรีขจร ผู้อำนวยการฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง , คุณสมพงษ์ ปรีเปรม ผู้อำนวยการกองแบบสถานีไฟฟ้า และเพื่อนร่วมงานทั้งจากกองออกแบบสถานีไฟฟ้า ,กองวิศวกรรมไฟฟ้าและทดสอบ ,กองวิจัย และฝ่ายปฏิบัติการเครือข่ายเขต 3 ภาค 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดชลบุรีทุกท่านที่ไม่ได้ระบุชื่อในครั้ง นี้ ที่ได้สนับสนุนให้ผู้วิจัยมีโอกาสและเวลาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องโครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา วิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานต่างๆ

อนึ่ง การศึกษาในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ Counterpart Fund ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย

ความดีอันใดเนื่องมาจากประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอมอบแต่บิดาและมารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรัก ความห่วงใย ให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ชนาลัย จรุงเพ็ญ

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	47
ผล	47
วิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	78
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางแสดงการกำหนดแบบจำลอง(Model)	43
2 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties : aluminium (solid))	44
3 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties : air (fluid))	44
4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions : Heat)	45
5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions : Inlets)	45
6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions : Wall)	45
7 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control : Equations)	46
8 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control : Pressure-Velocity Coupling)	46
9 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control : Discretization Scheme)	46
ตารางผนวกที่	
ข1 ข้อมูลด้านเทคนิคของ NGR จากผู้ผลิต (Technical Data of NGR)	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาพภายในตู้ NGR หลังจากการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี	8
2	สภาพภายในตู้ NGR หลังจากการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี (ต่อ)	8
3	สภาพภายนอกตู้ NGR หลังจากการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี	9
4	สภาพภายนอกตู้ NGR หลังจากการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี (ต่อ)	9
5	ตัว NGR สภาพปกติ	10
6	ตัว NGR สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี สภาพหลังเกิดลุกไหม้	10
7	Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบ สภาพปกติ	11
8	Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบ สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี หลังเกิดลุกไหม้	11
9	Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบ สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี หลังเกิดลุกไหม้	12
10	Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบ สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี หลังเกิดลุกไหม้(ต่อ)	12
11	ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สภาพปกติ	13
12	ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี หลังเกิดลุกไหม้	13
13	ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้านนทรี จ.ปราจีนบุรี เกิดหลอมละลาย	14
14	อุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้านนทรี จ.ปราจีนบุรี เกิดหลอมละลาย	14
15	สายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าระยอง 2 จ.ระยอง เกิดหลอมละลาย	15
16	อุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าระยอง 2 จ.ระยอง เกิดหลอมละลาย	15
17	ตู้ NGR ผลิตภัณฑ์ BGES UTAH	17
18	ตู้ NGR ผลิตภัณฑ์ UTAH	17
19	แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ NGR ผลิตภัณฑ์ BGES	18
20	แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ NGR ผลิตภัณฑ์ UTAH	18
21	ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของแรงดันในระบบต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding)	19

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของแรงดันในระบบต่อ NGR	19
23	ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน (Ungrounded System)	22
24	ระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding)	22
25	ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistant Grounding)	22
26	ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ (Reactance Grounding)	23
27	ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านขดลวดดับอาร์ก (Arc-suppression Coil Grounding)	23
28	ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer Grounding)	23
29	แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการ Import ข้อมูล	30
30	แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการ Export ข้อมูล	31
31	แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการใช้งานกับ Solver	31
32	แสดงโครงสร้างของโปรแกรม FLUENT (Basic Program Structure	36
33	หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 25 kVA	40
34	Data Acquisition (MW100)	40
35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัว NGR กับเวลาที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องขนาด 40 แอมป์ 360 โวลต์	42
36	แสดงการร้อนขึ้นของ NGR ขนาด 12.7 โอห์ม เมื่อจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องขนาด 25 แอมป์	42
37	แบบจำลองตู้ Neutral Grounding Resistor	43
38	แสดงกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์(ไม่มีพัดลม)	47
39	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR	48
40	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR	49
41	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR	50

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 2	51
43	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 2	52
44	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 2	53
45	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 3	54
46	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 3	55
47	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 3	56
48	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 4	57
49	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 4	58
50	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 4	59
51	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 5	60
52	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 5	61
53	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 5	62
54	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 6	63
55	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 6	64
56	แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 6	65
57	แบบจำลองของตู้ NGR หลังจากปรับปรุงโดยติดตั้งพัดลมระบายอากาศ	68
58	แสดงกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์(ติดตั้งพัดลมระบายอากาศ)	69
59	แสดงการกระจายตัวของความดันภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR (หลังติดตั้งพัดลม)	70
60	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR (หลังติดตั้งพัดลม)	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Delta \mathcal{G}$	อุณหภูมิของอากาศภายในตู้ที่เพิ่มขึ้น
$P_{v,eff}$	พลังงานความร้อนที่กระจายตัวเนื่องจากปัจจัยจากโหลด
A_m	การกระจายตัวของความร้อนที่ผิวของตู้
α	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน : 6.0 W/m ² .K ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่สูงไม่เกินความสูงครึ่งหนึ่งของตู้ 4.5 W/m ² .K ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ภายในความสูงของตู้ 3.0 W/m ² .K ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่สูงเกินความสูงครึ่งหนึ่งของตู้
ρ	ความหนาแน่น (kg/m ³ , lb _m /ft ³)
\bar{v}	ความเร็ว (m/s, ft/s)
S_m	แหล่งกำเนิดมวล (ในการศึกษาครั้งนี้ให้ $S_m = 0$)
P	ความดันสถิตย์ (Pa, atm, mmHg, lb _f /ft ²)
τ	ความเค้น (Pa, lb _f /ft ²)
\bar{g}	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ² , ft/s ²) (9.81 m/s ² , 32.1740 ft/s ²)
\bar{F}	แรง (N, lb _f)
E	พลังงาน (J, kJ, cal, Btu)
k_{eff}	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m-K, Btu/ft-h-°F)
T	อุณหภูมิ (K, °C, °R, °F)
h	ความจุความร้อนจำเพาะ (energy/mass, energy/mole)
S_h	ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาหรือแหล่งกำเนิดความร้อนในปริมาตร (ในการศึกษาครั้งนี้ให้ $S_h = 0$)

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ Neutral Grounding Resistor ของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

A Study of Temperature Distribution inside The Neutral Grounding Resistor Cabinet of Provincial Electricity Authority of Thailand

คำนำ

Neutral Grounding Resistor (NGR) เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการต่อลงดินแบบผ่านความต้านทาน (Resistant Grounding) ในการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (System Grounding) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำกัดกระแสผิดพลาดที่ไหลลงดินลดผลกระทบจากปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) ซึ่งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) โดยได้มีการทดลองนำมาติดตั้งครั้งแรกที่สถานีไฟฟ้านคร 1 จ.ปทุมธานี ต่อมาได้มีการพิจารณานำมาใช้งานในสถานีไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมจำนวน 30 สถานีฯ แต่จากการติดตามผลการใช้งานกลับพบปัญหาเกิดชำรุดลุกลามภายในตู้ในหลายสถานีฯและบางสถานีฯ อุปกรณ์ประกอบภายในตู้ เช่น สายไฟ, ปลั๊กไฟ จะทนได้จึงเกิดการหลอมละลายและบิดงอ

สาเหตุเบื้องต้นคาดว่าเกิดจากกระแสไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานอันเนื่องมาจากเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) หรืออาจเกิดจากกระแสไหลไม่สมดุล (Unbalanced Current) ทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตู้ประกอบกับการระบายอากาศในตู้ที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นเมื่อมีความร้อนสะสมจนเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ เช่น สายไฟ, ปลั๊กไฟ จะทนได้จึงเกิดการหลอมละลายและบิดงอ และเกิดลุกลามตามมา

งานวิจัยนี้ให้เห็นความสำคัญของการศึกษาระบบระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากผลของความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากจะมีผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ด้วยแล้ว ยังมีส่วนสำคัญสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการความสามารถในการนำกระแสสูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึง เซอร์คิตเบรกเกอร์ หรือ อุปกรณ์ที่

มีขดลวดต่างๆ ผู้เกี่ยวข้องจึงจำเป็นต้องศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

ในต่างประเทศการออกแบบระบบดังกล่าว เป็นความรับผิดชอบของผู้ผลิตที่จะออกแบบและรับรองคุณภาพให้เป็นไปตามข้อกำหนด ข้อมูลและวิธีการออกแบบจึงไม่เป็นที่แพร่หลายในทางวิชาการมากนัก ประกอบกับผู้ออกแบบได้คำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกไว้แล้ว จึงไม่เกิดปัญหาในการติดตั้งใช้งาน แต่ในประเทศไทย อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ผู้ผลิตในประเทศไม่สามารถผลิตเองได้ จึงได้มีการนำอุปกรณ์บางส่วนจากต่างประเทศ และบางครั้งได้นำมาดัดแปลงใช้งาน เช่น นำมาติดตั้งภายในตู้ ซึ่งหากมิได้มีการออกแบบระบบระบายอากาศที่ดีแล้ว นอกจากจะลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์แล้ว ยังอาจนำไปสู่การเสื่อมสภาพโดยเร็วอีกด้วย

การศึกษาระบบระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถทำได้โดยคำนวณลักษณะสภาวะการไหลของอากาศโดยการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) และการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) หรือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการแก้สมการ ซึ่งปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน โปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) ก็เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ ซึ่งได้รับการพิสูจน์มาแล้วว่าสามารถหาผลเฉลยได้แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาผลเฉลยด้วยการทดลองจริง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณลักษณะสภาวะการไหลของอากาศ โดยอาศัยหลักการของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยการใช้หลักการของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการแก้สมการ

2. เพื่อศึกษาและพิสูจน์สมมติฐานว่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้ Neutral Grounding Resistor (NGR) อันเนื่องมาจากเกิดกระแสไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง สามารถทำให้อุปกรณ์และ/หรืออุปกรณ์ประกอบภายในตู้เกิดการเสื่อมสภาพจนเกิดการลุกไหม้ได้หรือไม่

3. เพื่อนำเสนอแนวทางปรับปรุงข้อกำหนดของระบบระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า Neutral Grounding Resistor (NGR) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดลุกไหม้ในอนาคต

4. เพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการออกแบบและวิเคราะห์ผลของการออกแบบระบบระบายอากาศในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ผลิตภายในประเทศให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

การตรวจเอกสาร

ความเป็นมาและปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ระบบ 115/33 หรือ 115/22 กิโลโวลต์ เป็นแบบ Y-Y และ Δ -Y โดยมีระบบการต่อลงดินจะมีการต่อลงดินของจุดนิวทรัล (Neutral) ด้านทุติยภูมิของขดลวด (Secondary) เป็นแบบวางลงดินโดยตรง หรือที่เรียกกันว่า Solidly-ground

ต่อมาในระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม เริ่มมีการใช้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งเป็นโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) มากขึ้น เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ Programmable Logic Controller (PLC) , รีเลย์ (Relay) , ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive) , ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier) , เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter) และอื่นๆอีกมาก ผลจากการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปคลื่นเพี้ยนไปจากเดิมที่ความถี่หลักมูล (50 Hz) ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ในระบบทำงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหายได้ การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการแก้ไขหรือลดผลกระทบดังกล่าว

กฟภ. จึงได้พิจารณานำเอา Neutral Grounding Resistor (NGR) มาติดตั้งใช้งานที่สถานีไฟฟ้าในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม จำนวนทั้งสิ้น 30 สถานีฯ เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Dip) ซึ่งเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) อันดับต้นๆที่พบเป็นจำนวนมาก โดยอยู่ระหว่างติดตามผลการใช้งานและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น แต่จากการติดตามผลการใช้งานกลับพบปัญหาการเกิดชำรุดลูกไหม้ทั้งตู้หลายสถานีฯ สาเหตุเบื้องต้นคาดว่าเกิดจากกระแสไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน อันเนื่องมาจากเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) หรือ อาจเกิดจากกระแสไหลไม่สมดุล (Unbalanced Current) ทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตู้ ประกอบกับการระบายอากาศในตู้ไม่เพียงพอ เมื่อเกิดประกายไฟจากอุปกรณ์ที่ชำรุด จึงเกิดลูกไหม้ และในหลายสถานีฯ เกิดปัญหาอุปกรณ์ประกอบภายในตู้เกิดการหลอมละลายและบิดงอเนื่องมาจากความร้อน กฟภ. จึงได้รื้อถอนอุปกรณ์ประกอบแรงต่ำบางส่วนออกจากตู้ และอยู่ระหว่างศึกษาแนวทางแก้ไข

ปัญหาการชำรุดและลุกไหม้ของตู้ NGR ได้ส่งผลเสียหายอย่างยิ่งต่อทรัพย์สินของฟก. และยังเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องตามมา ซึ่งการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องดังกล่าวมักจะกระทบในวงกว้าง เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้ง NGR เป็นจุดนิวทรัล (Neutral) ของหม้อแปลง ตำแหน่งที่ติดตั้งแสดงตามแบบไดอะแกรม ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่จะระบุข้อกำหนดของอุปกรณ์ (Specification) ว่าสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดเท่าใด (Maximum Ambient Temperature) ในขั้นตอนการออกแบบตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าจะเป็นการออกแบบจากผู้ผลิต ซึ่งหากเป็นผู้ผลิตในต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะมีการควบคุมและรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์จากหน่วยงานทดสอบของต่างประเทศ โดยจะออกแบบอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส แต่หากเป็นการผลิตอุปกรณ์บางส่วนในต่างประเทศและนำมาประกอบในประเทศไทยแล้ว จะประสบปัญหาการออกแบบตู้อุปกรณ์โดยไม่ได้คำนึงถึงความร้อนที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการระบายอากาศในตู้ อุปกรณ์ไฟฟ้ายังคงมีน้อยมาก

งานวิจัยนี้ได้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการออกแบบระบบระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อพัฒนาขีดความสามารถในการออกแบบและวิเคราะห์ผลของการออกแบบระบบระบายอากาศในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ผลิตภายในประเทศให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง เนื่องจากอุปกรณ์ชำรุด และช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้ใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Labos *et al.* (2005) ได้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดการผิดพลาดทางกล (Mechanical failure) ใน NGR อันเนื่องมาจากเกิดกระแสผิดปรongลงดินเฟสเดียวในระบบ (Single Line to Ground fault) แล้วเป็นผลให้เกิดการสั้นที่ความถี่สูงระหว่างอินดักแตนซ์ของตัว NGR และคาปาซิแตนซ์ที่คาบเกี่ยวระหว่างเฟสและจุดนิวทรัลของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Coupling capacitance Between Phase-to-neutral) ทำให้เกิดแรงดันสูงตกคร่อมที่ NGR จนเกิดความร้อน เป็นผลให้ตัว NGR ชำรุด ลุกด้วยแตก อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้กล่าวถึงกรณีที่ฉนวนสายไฟฟ้าแรงต่ำและอุปกรณ์ประกอบภายในตู้เกิดเสื่อมสภาพหลอมละลายและบิดงอเนื่องมาจากความร้อนโดยที่อุปกรณ์ NGR ยังไม่ได้เกิดชำรุดเสียหาย

Gillman and May (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดไฟไหม้ขึ้นเนื่องมาจากการผิดพลาดทางกลและทางไฟฟ้า (Mechanical and electrical failures) สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การจุดติดไฟเนื่องจากสาเหตุทางกล (Mechanical sources) อันได้แก่ การเกิดความร้อนเนื่องจากการเสียดทาน การเกิดความร้อนจนสูงเกินอุณหภูมิจุดติดไฟของวัสดุนั้นๆ รอยถลอกหรือรอยตัดของสายไฟฟ้า หรือฉนวนเสื่อมสภาพทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร การรั่วของก๊าซหรือของเหลวที่ติดไฟได้ การเกิดสนิมที่ขั้วสัมผัสทางไฟฟ้า

2. การจุดติดไฟเนื่องจากสาเหตุทางไฟฟ้า (Electrical sources) อันได้แก่ การเกิดประกายไฟ การเกิดความต้านทานสูงที่จุดเกิดประกายไฟ ความร้อนภายนอกสูงเกินค่าความเป็นฉนวนของอุปกรณ์จะทนได้ การเกิดคายประจุของไฟฟ้าสถิต

จากการศึกษา พบว่า อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานโดยส่วนใหญ่จะระบุข้อกำหนดของอุปกรณ์ (Specification) ว่าสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดเท่าใด (Maximum Ambient Temperature) ขั้นตอนการออกแบบการระบายอากาศของตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จึงมักจะเป็นการออกแบบจากผู้ผลิต การพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเป็นการออกแบบจากผู้ผลิตไม่เป็นที่เผยแพร่ในเชิงวิชาการมากนัก บางผู้ผลิตได้มีกล่าวถึงไว้แต่ไม่ละเอียดนัก เช่น Gremmel (1998) ได้กล่าวไว้ใน ABB: Switchgear Manual ถึงแนวทางการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า (Temperature Rise In Enclosed Switch Boards) โดยอ้างอิงมาตรฐาน DIN EN 60439-1 (VDE 0660 Part 500) พบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทำให้อากาศภายในตู้ร้อนแปรตรงกันกับความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้ และแปรผกผันกับอุณหภูมิพื้นผิวที่เกิดจากการกระจายตัวของความร้อน (Heat dissipation surface temperature) ดังสมการ

$$\Delta \theta = \frac{P_{v,eff}}{\alpha A_m} \quad (1)$$

Hoffman Enclosure Inc. (2007) พบว่า มีตัวแปรหลายตัวที่มีผลทำให้อุณหภูมิที่ผนังตู้ภายในเพิ่มขึ้นจะประกอบด้วยความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ขนาดตู้ ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำตู้สื่ที่ใช้ทำตู้ อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดที่เกิดขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์นั้นๆ และการเกิดความร้อนสะท้อนกลับของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ การออกแบบการระบายความร้อนภายในตู้จึงต้องคำนึงถึงองค์ประกอบเหล่านี้ด้วย

ผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดไฟไหม้ในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า (Fire in Electrical Cabinets) มีค่อนข้างน้อยเช่นกัน Mangs *et al.* (2003) ได้ทำการทดลองเพื่อหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในการเกิดไฟไหม้ในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า (Rate of Heat Release) เพื่อหาอัตราการสูญเสียมวล (Mass Loss), ปริมาณ CO, CO₂, ก๊าซและควันที่เกิดขึ้น, รวมถึงวิเคราะห์อุณหภูมิที่ผนัง (Wall Temperature)

นอกจากนี้ยังมีผลการวิจัยของ Keski-Rahkonen *et al.* (1993) ที่ได้ทำการทดลองเพื่อที่จะวิเคราะห์หากลไกการเกิดจุดติดไฟของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical Fire Ignition) เกี่ยวกับการเกิดไฟไหม้ในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเกิดลุกไหม้มักเกิดจากสายไฟฟ้าภายในตู้เกิดลัดวงจรหรือชำรุด ส่วน Me'lis *et al.* (2004) ก็ได้ทำการศึกษารูปแบบการเกิดติดไฟของตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายใต้ CARMELA Experimental Program โดยได้มีการทดลองเพื่อจำลองรูปแบบปรากฏการณ์การเกิดไฟไหม้ในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าและพบว่าช่องเปิดสำหรับระบายอากาศภายในตู้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดติดไฟ

สถิติการเกิดเหตุการณ์ตู้ NGR ลุกไหม้ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) มีจำนวน 6 สถานีคือ สถานีไฟฟ้าปลวกแดง 1, สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2, สถานีไฟฟ้าระยอง 2, สถานีไฟฟ้าคลองขวาง, สถานีไฟฟ้าลำพูน 3 และสถานีไฟฟ้าเขาย้อย ส่วนหลายสถานีเกิดปัญหาสายไฟฟ้าวางจรแรงต่ำและสายไฟฟ้าควบคุมเกิดหลอมละลายอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้ ดังแสดงในภาพที่ 1-15

การที่ความร้อนภายในตู้สูงเกินขีดของสายไฟฟ้าแรงต่ำนอกจากเป็นสาเหตุทำให้เกิดสายไฟและอุปกรณ์ประกอบหลอมละลายแต่ยังมีผลทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ลดลง อย่างไรก็ตามสาเหตุของการที่ NGR เกิดชำรุดลุกไหม้ อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุประกอบกัน งานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาการกระจายตัวของความร้อนที่สะสมภายในตู้ NGR เท่านั้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับตู้ไฟฟ้าอื่นๆ ที่จะต้องติดตั้งภายในตู้กลางแจ้งได้เช่นกัน

ในงานวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ทำการศึกษาระบบระบายอากาศภายในตู้ NGR จากแบบตู้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดปัญหาลุกไหม้ โดยการจำลองโมเดลเพื่อศึกษาการไหลของอากาศภายในตู้ อุปกรณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) ในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม Fluent ในการหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้



ภาพที่ 1 สภาพภายในตู้ NGR หลังเกิดการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี



ภาพที่ 2 สภาพภายในตู้ NGR หลังเกิดการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี (ต่อ)



ภาพที่ 3 สภาพภายนอกตู้ NGR หลังเกิดการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี



ภาพที่ 4 สภาพภายนอกตู้ NGR หลังเกิดการลุกไหม้ที่สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี(ต่อ)



ภาพที่ 5 ตัว NGR สภาพปกติ



ภาพที่ 6 ตัว NGR สถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี สภาพหลังเกิดลูกไหม้



ภาพที่ 7 Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบ สภาพปกติ



ภาพที่ 8 Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบสถานีไฟฟ้าเขาย้อย จ.เพชรบุรี หลังเกิดลัดไหม้



ภาพที่ 9 Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบสถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี
หลังเกิดลูกไหม้



ภาพที่ 10 Current Transformer และอุปกรณ์ประกอบสถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี
หลังเกิดลูกไหม้(ต่อ)



ภาพที่ 11 ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานภาพกคดี



ภาพที่ 12 ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 จ.ชลบุรี หลังเกิดอุทกภัย



ภาพที่ 13 ระบบไฟส่องสว่างและสายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้านนทบุรี
จ.ปราชินบุรี เกิดหลอมละลาย



ภาพที่ 14 อุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้านนทบุรีจ.ปราชินบุรี เกิดหลอม
ละลาย



ภาพที่ 15 สายไฟฟ้าแรงต่ำภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าระยอง 2 จ.ระยอง เกิดหลอมละลาย



ภาพที่ 16 อุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR สถานีไฟฟ้าระยอง 2 จ.ระยอง เกิดหลอมละลาย

ข้อมูลทั่วไปของ NGR ที่ถูกศึกษา

ตู้และตัว NGR ที่ กฟภ. นำมาใช้งานเป็นแบบตู้ติดตั้งภายนอกอาคาร ภายในตู้มีการติดตั้งตัว NGR ชนิดพิกัดแรงดัน 12.7 กิโลโวลต์ ตัว NGR ทำมาจาก NiCr 3020 ความต้านทานรวมทั้งหมด 12.7 โอห์ม ทนกระแสสูงสุดในกรณีเกิดการลัดวงจรได้ 1000 แอมป์ในเวลาไม่เกิน 10 วินาที และทนกระแสไหลต่อเนื่องได้ที่ 10 แอมป์ และทนความร้อนได้สูงถึง 760 องศาเซลเซียส ในกรณีเกิดการลัดวงจรได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อตัว NGR นอกจากนี้มีการติดตั้ง สวิตช์มีดตอน , หม้อแปลงกระแส และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำ เช่น ไฟแสงสว่าง , อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) และ แผงวงจรควบคุม ตัวตู้ทำจากเหล็กหนาอย่างน้อย 2 มิลลิเมตร ตู้และตัว NGR ที่ กฟภ. นำมาใช้งานใน 30 สถานีฯ เป็นผลิตภัณฑ์ BGES และ UTAH ดังแสดงในภาพที่ 17-20

ตู้และตัว NGR ที่นำมาศึกษาเป็นของผลิตภัณฑ์ UTAH กว้าง 2.2 เมตร ลึก 2.8 เมตร และสูง 2.6 เมตร มีระดับการป้องกัน IP54 โดยมีช่องระบายอากาศขนาดเล็กปิดด้วยตะแกรงลวดจำนวน 8 ช่อง ดังแสดงในภาพที่ 18

สภาพการจ่ายไฟปัจจุบันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคส่วนใหญ่มีหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพิกัด ระบบ 115/33 หรือ 115/22 กิโลโวลต์ เป็นแบบ Y-Y และ Δ -Y โดยมีระบบการต่อลงดินจะมีการต่อลงดินของจุดนิวทรัล(Neutral) ด้านทุติยภูมิของขดลวด (Secondary) เป็นแบบวางลงดินโดยตรง หรือที่เรียกกันว่า Solidly Grounding เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรแบบเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault) จะทำให้แรงดันระหว่างเฟสลดลง (Voltage Dip) ดังภาพที่ 21 แต่หากมีการต่อแบบผ่านความต้านทานลงดิน (Resistant Grounding) จะสามารถช่วยลดปัญหาแรงดันตกระหว่างเฟสลดลงได้ แต่ทำให้แรงดันเฟสเทียบกับกราวด์เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 22 จึงได้นำเอา NGR มาทดลองติดตั้งในสถานีไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่อุตสาหกรรม จำนวน 30 สถานีฯ



ภาพที่ 17 ตู้ NGR ผลิตภัณช์ BGES



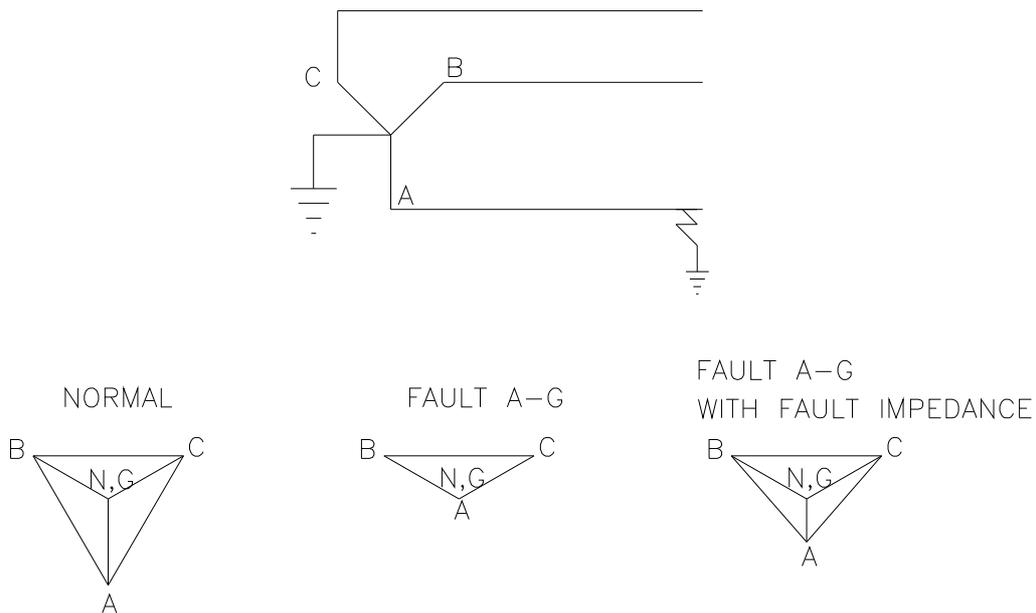
ภาพที่ 18 ตู้ NGR ผลิตภัณช์ UTAH



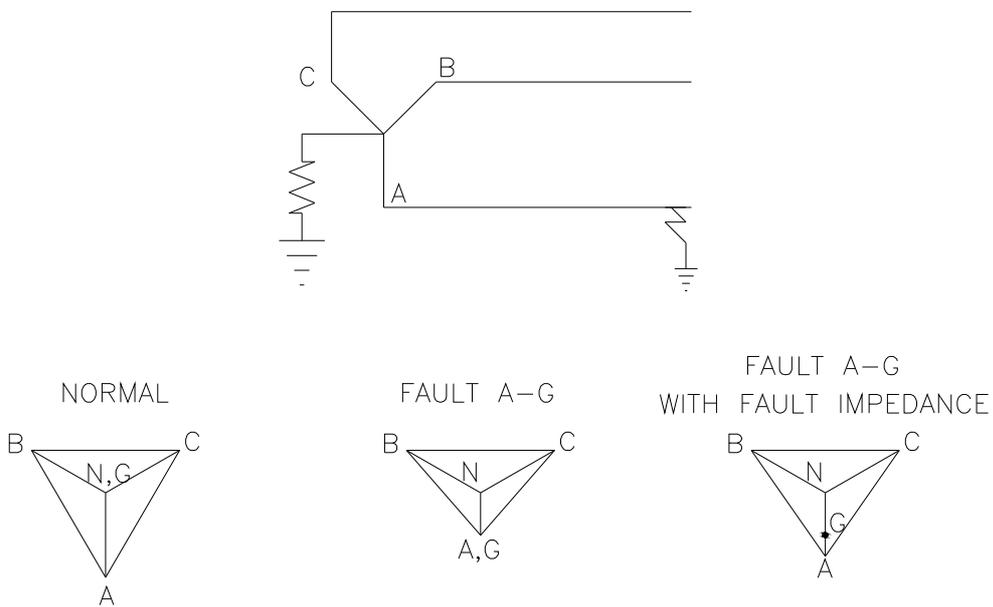
ภาพที่ 19 แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ NGR ผลิตภัณช์ BGES



ภาพที่ 20 แสดงอุปกรณ์ภายในตู้ NGR ผลิตภัณช์ UTAH



ภาพที่ 21 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของแรงดันในระบบต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding)



ภาพที่ 22 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของแรงดันในระบบต่อ NGR

การต่อลงดิน (Grounding System)

การต่อลงดิน(Grounding System) หมายถึง การต่อส่วนของระบบไฟฟ้า หรือส่วนโลหะเข้ากับดิน เพื่อให้ส่วนที่ต่อนั้นมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

จุดประสงค์หลักของการต่อลงดินเพื่อต้องการลดอันตรายที่จะเกิดต่อบุคคลและลดความเสียหายที่จะเกิดต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆหรือระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปการต่อลงดิน แบ่งได้เป็น

1. การต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (System Grounding)

ธนวัฒน์ (2547) ได้อธิบายเกี่ยวกับการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า (System Grounding) ว่าเป็นการต่อจุดใดจุดหนึ่งในระบบไฟฟ้าลงดิน ซึ่งโดยทั่วไปจะต่อจากจุดกลางหรือสายนิวทรัลลงดิน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อ

- ลดแรงดันไฟฟ้าเกินเมื่อเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงดิน (Single Line to Ground Fault)
- ทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้ตามฟังก์ชันที่ถูกต้อง เนื่องจากหากไม่มีการต่อลงดิน เมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน กระแสอาจจะมีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีตัวนำให้กระแสลงดิน ซึ่งทำให้ขนาดของกระแสจะไม่แน่นอน อุปกรณ์ป้องกันจะไม่สามารถตรวจจับได้
- ลดพลังงานสูญเสียในสายส่งที่ยาวๆ เนื่องจากหากระบบไม่ต่อลงดิน ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายเฟสกับดินจะมีค่าสูง โดยจะไหลตลอดเวลาทำให้มีพลังงานสูญเสียมากในระบบ

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้ากำลัง จะแยกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน ระบบจำหน่ายที่ไม่มีการต่อลงดินหมายถึงระบบที่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายมีการต่อแบบเดลต้าหรือวายที่ไม่มีจุดต่อลงดิน ดังภาพที่ 23 สายป้อนจะเป็นสามเฟสสามสายหรือเฟสเดียวสองสาย กับดักฟ้าผ่าจะต่อระหว่างสายเฟสกับดิน โดยอาจต่อลงดินโดยตรงหรือต่อผ่านตัวถังหรือเปลือกนอกของอุปกรณ์ แล้วต่อลงดินโดยตรงหรือผ่านช่องว่างอากาศ(spark gap)

ระบบที่มีการต่อลงดิน โดยปกติระบบที่มีการต่อลงดินจะได้จากการต่อลงดินของจุดนิวทรัลด้านทุติยภูมิของขดลวดที่มีการต่อแบบวาย ซึ่งอาจจะต่อลงดินโดยตรง (Solidly Ground) หรือต่อผ่านอุปกรณ์จำกัดกระแสที่ไม่สามารถปลดออกได้ เช่น รีแอกเตอร์ (Reactor) เป็นต้น โดยทั่วไปจุดที่ต่อลงดินจะเป็นจุดที่สายนิวทรัลต่ออยู่ สายนิวทรัลอาจจะต่อลงดินหลายๆจุด (multigrounded) ตามระยะทางหรืออาจแยกจากกันทั้งหมดและไม่มีส่วนใดต่อลงดินยกเว้นต่อลงดินที่แหล่งจ่ายไฟ (unigrounded)

ระบบที่มีการต่อลงดิน (ชนวิวัฒน์ ,2547) ยังแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1.1 การต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding) เป็นการต่อจากจุดนิวทรัล (Neutral) ลงดินโดยตรงไม่ผ่านความต้านทานใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 24 การต่อลงดินแบบนี้ กระแสลัดวงจรลงดินจะมีค่าสูงกว่าการต่อลงดินแบบอื่น

1.2 การต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistant Grounding) การต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding) จะมีปัญหาเรื่องกระแสลัดวงจรลงดินที่มีขนาดสูงเกินไปจึงต้องจำกัดขนาดกระแสลัดวงจรลงดินให้มีขนาดต่ำลงซึ่งสามารถทำได้โดยการต่อผ่านความต้านทานตามภาพที่ 25

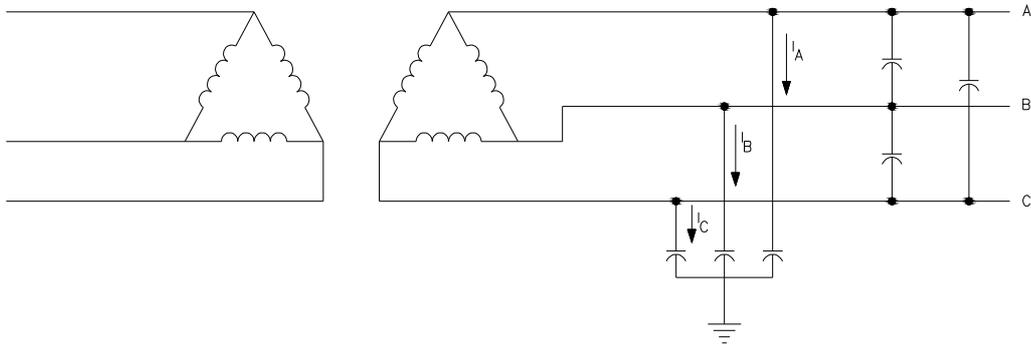
1.3 การต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ (Reactance Grounding) ตามภาพที่ 26

1.4 การต่อลงดินผ่านขดลวดดับอาร์ก (Arc-suppression Coil Grounding) ตามภาพที่

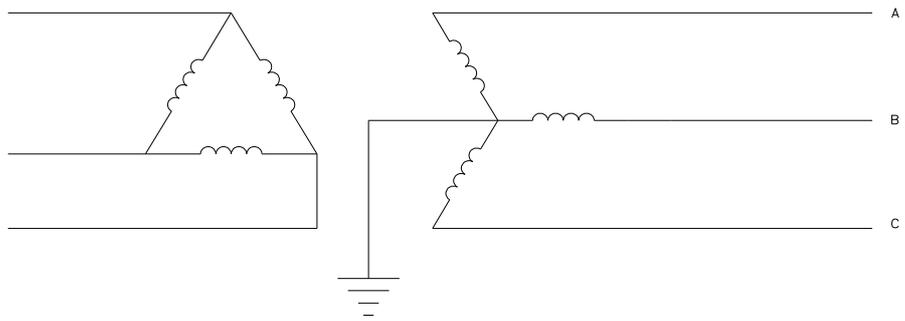
27

1.5 การต่อลงดินผ่านหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer Grounding) ตามภาพ

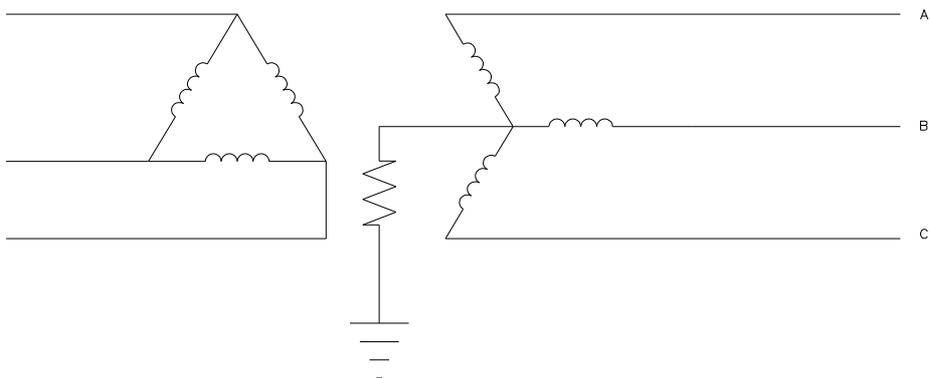
ที่ 28



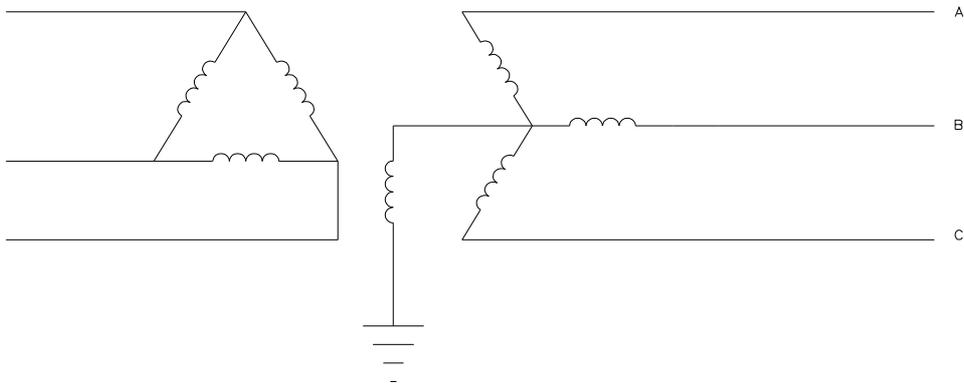
ภาพที่ 23 ระบบที่ไม่มีการต่อลงดิน (Ungrounded System)



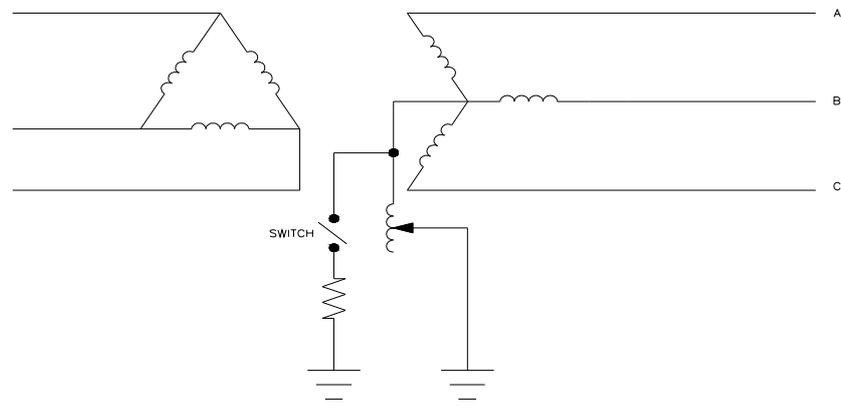
ภาพที่ 24 ระบบที่มีการต่อลงดินโดยตรง (Solidly Grounding)



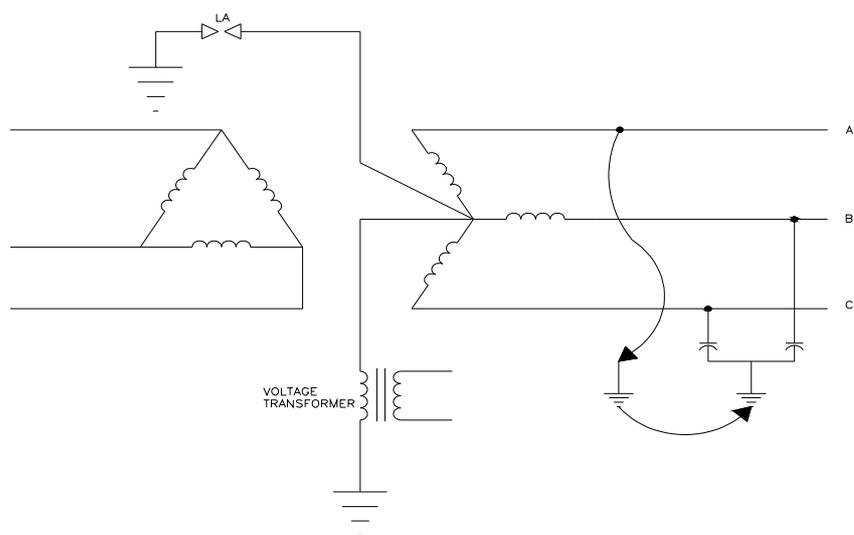
ภาพที่ 25 ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านความต้านทาน (Resistant Grounding)



ภาพที่ 26 ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านรีแอกแตนซ์ (Reactance Grounding)



ภาพที่ 27 ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านขดลวดดับอาร์ก (Arc-suppression Coil Grounding)



ภาพที่ 28 ระบบที่มีการต่อลงดินผ่านหม้อแปลงแรงดัน (Voltage Transformer Grounding)

2. การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Equipment Grounding)

การต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า หมายถึง การต่อส่วนที่เป็นโลหะ รวมทั้งส่วนประกอบในการก่อสร้างและโครงสร้างอื่นๆ ที่อาจมีแรงดันไฟฟ้าได้ ที่อาจมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ให้ถึงกันตลอดแล้วต่อลงดิน เพื่อให้ส่วนที่เป็นโลหะที่ต่อถึงกันนั้นมีศักดาไฟฟ้าเป็นศูนย์หรือเท่ากับดินซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อ

- เพื่อความปลอดภัยแก่คน สัตว์ สิ่งมีชีวิตอื่นๆ จากการโดนไฟฟ้าดูด
- เพื่อให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง
- เพื่อให้กระแสที่รั่วไหลและกระแสเนื่องจากไฟฟ้าสถิตไหลลงดิน

3. การต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection Grounding)

ระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ใช้อยู่ คือ กับดักฟ้าผ่า (Lightning arrester) ใช้ในการป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่า (Lightning) หรือการเปิด-ปิดวงจร (Switching) ซึ่งในการติดตั้งในระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ จะต้องมีการต่อลงดินเพื่อเป็นทางให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงดินไป โดยไม่ให้ไหลเข้าอุปกรณ์ที่เราป้องกัน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้กับดักฟ้าผ่าป้องกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง เป็นต้น

พื้นฐานการคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ กระบวนการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ระบบสมการการเคลื่อนที่ของพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) การถ่ายเทมวล (Mass Transfer) และอื่นๆ โดยการใช้การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming) ช่วยในการคำนวณ โดยลักษณะการไหล การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลและอื่นๆ ทั้งหมดสามารถจำลองผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว (วารสารรัตน์, 2548)

ประโยชน์ของ CFD ในวงการวิศวกรรมศาสตร์ นอกเหนือจากการช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบแล้วกระบวนการ CFD ยังสามารถช่วยลดความเสี่ยงและความเป็นไปได้

บางประการของกระบวนการทดลอง เช่น การจำลองระบบที่ใหญ่และซับซ้อน การจำลองระบบที่มีสถานะแวดล้อมที่อันตราย การออกแบบตำแหน่งเครื่องตรวจจับควัน (Smoke Detector) หรือ หัวสปริงเกอร์ดับไฟ (Sprinkler) ในอาคารสำนักงาน เป็นต้น ส่วนประโยชน์ของ CFD ในวงการวิทยาศาสตร์ คือ การใช้ CFD ช่วยในการจำลองปรากฏการณ์บางอย่าง เช่น การจำลองการเกิดไฟไหม้ในป่า การจำลองลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นเนื่องจากเงื่อนไขต่างๆ เป็นต้น (วารสารรัตน์, 2548)

ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการ CFD ยังละเอียดกว่าข้อมูลที่ได้จากกระบวนการวัดจริงจากกระบวนการทดลอง ทำให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของระบบต่างๆ ได้อย่างชัดเจนรวดเร็ว เนื่องจากการทดลองจริงนั้นมีข้อจำกัดจากค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้ในการวัด อีกทั้งกระบวนการ CFD นั้นสามารถทำซ้ำได้ (Repeatable) (วารสารรัตน์, 2548)

ขั้นตอนของ CFD

1. ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processing)

ขั้นตอนก่อนการคำนวณนี้จะเป็นการกำหนดปัญหาของการไหล โดยในแต่ละซอฟต์แวร์จะมีการรับค่าต่างๆในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่จะออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งาน เช่น มีหน้าต่างแสดงข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการในการคำนวณและให้ทำการใส่ค่า โดยเมื่อทำการใส่ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ซอฟต์แวร์จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณแล้ว ซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลที่ผู้ใช้งานกรอกมาทำการจัดรูปแบบให้เหมาะสม เพื่อใช้ในขั้นตอนการคำนวณต่อไป โดยในขั้นตอนก่อนการคำนวณมีสิ่งที่ผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องทำดังนี้ คือ

1.1 การสร้างขอบเขตของปัญหาที่ต้องการศึกษา

ขั้นตอนนี้ คือ การสร้างรูปทรงภายนอกของบริเวณที่ต้องการจะศึกษา โดยส่วนใหญ่แล้วขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะทาง CAD (Computer-Aided Design) เช่น AutoCAD Pro/Engineer หรือ Solidwork ในการสร้างขอบเขต (Domain) ของปัญหาที่ต้องการศึกษา เช่น ถ้าต้องการศึกษาการไหลผ่านลำตัวรถยนต์ก็จะต้องใช้โปรแกรม CAD เหล่านี้ในการสร้างรูปร่างภายนอกของรถยนต์และขอบเขตของการไหลรอบตัวรถยนต์ก่อนเป็นต้น

1.2 การสร้างกริด (Grid Generation)

ขั้นตอนนี้ คือ ขั้นตอนในการสร้างตำแหน่งให้แต่ละจุดกริด ภายในบริเวณขอบเขตของ ปัญหาที่ต้องการจะศึกษา ซึ่งขอบเขตนี้ถูกสร้างขึ้นไว้แล้วจากโปรแกรม CAD ดังในหัวข้อที่ 3.1.1 โดยตัวแปรที่เราสนใจ เช่น ความเร็ว อุณหภูมิ และ ความดัน จะถูกเก็บไว้ในแต่ละจุดกริดที่กระจายตัวอยู่ในขอบเขตนี้ การสร้างกริดนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการกระจายตัวของกริดคือ กริดแบบมีโครงสร้าง (Structured Grid) และ กริดแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid) โดยกริดแบบมีโครงสร้างนั้นจะมีการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่วนกริดแบบไม่มีโครงสร้าง จะมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งรูปทรงของกริดทั้ง 2 ประเภทนั้นจะมีรูปทรงเป็นอะไรก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วกริดแบบมีโครงสร้างจะใช้กริดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม และกริดแบบไม่มีโครงสร้างจะใช้กริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม

ข้อดี ข้อจำกัด และปัญหาที่นิยมใช้ของกริดแต่ละประเภท คือ กริดแบบมีโครงสร้างนั้นใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์มาก และใช้เวลาในการประมวลผลไม่นานเท่ากริดแบบไม่มีโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม กริดแบบมีโครงสร้างนั้นเหมาะกับปัญหาที่มีรูปร่างของขอบเขตไม่ซับซ้อนมากเกินไปนักเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดทางโครงสร้างที่เป็นระเบียบของ กริด ส่วนกริดแบบไม่มีโครงสร้างนั้นเหมาะสมกับปัญหาที่มีรูปร่างของขอบเขตที่ซับซ้อนเนื่องจากสามารถวางการกระจายตัวของกริดได้เป็นอิสระตามรูปร่างของขอบเขตที่ต้องการจะศึกษา ซึ่งกริดแบบมีโครงสร้างและกริดแบบไม่มีโครงสร้างสามารถใช้ได้กับทั้งระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดและไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตาม กริดแบบมีโครงสร้างนิยมใช้กับระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดมากกว่า เช่นเดียวกับ กริดแบบไม่มีโครงสร้างที่นิยมใช้กับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (วารารัตน์, 2548)

1.3 การกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของสภาพแวดล้อม

ขั้นตอนนี้ คือ การกำหนดลักษณะการไหลที่ต้องการจะพิจารณาว่าเป็น

- การไหล 1 มิติ, 2 มิติ หรือ 3 มิติ
- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flows) หรือ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flows)

-การไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flows) หรือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady Flows)

-การไหลที่ไม่มีการอัดตัว (Incompressible Flows) หรือ การไหลที่มีการอัดตัว (Compressible Flows)

- การไหลที่มีสถานะเดียว (Single-Phase Flows) หรือ การไหลที่มีหลายสถานะ (Multi-Phase Flows)

-การไหลที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Inert Flows) หรือ การไหลที่มีปฏิกิริยาเคมี (Reacting Flows) เป็นต้น

1.4 การกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล

ขั้นตอนนี้ คือ การกำหนดค่าของไหลที่พิจารณาเป็นของไหลชนิดใด มีค่าความหนาแน่น(Density) และความหนืด (Viscosity) เท่าไร เป็นต้น

1.5 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions) และ เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)เป็นการกำหนดลักษณะเฉพาะของแต่ละปัญหาที่ต้องการจะศึกษาและวิเคราะห์ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นนั้นเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้แต่ละตัวแปรที่เราสนใจสำหรับจุด กริดทุกจุดในขอบเขตที่เราสนใจจะศึกษา ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นจะมีความสำคัญต่อการคำนวณมากถ้าปัญหาที่เราสนใจจะศึกษาเป็นปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัเวลา (Unsteady Flows)

ส่วนการกำหนดเงื่อนไขขอบนั้น คือ การกำหนดค่าของตัวแปร หรือ เงื่อนไขการกระจายตัวของตัวแปรบนขอบทั้ง 4 ด้านของขอบเขตที่เราสนใจจะศึกษาในกรณีที่มีการไหลที่สนใจเป็น 2 มิติ เป็นต้น ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบนั้น มีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการคำนวณเป็นอย่างมาก โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบนั้นเราจะต้องกำหนดให้ถูกต้องตามหลักความเป็นจริง เงื่อนไขขอบที่เป็นที่นิยมใช้มี 4 แบบใหญ่ๆ คือ

เงื่อนไขขอบทางเข้า (Inlet) ค่าที่กำหนดที่ขอบทางเข้าส่วนใหญ่จะได้อามาจากการวัดค่าของตัวแปรที่ต้องการกำหนดล่วงหน้าที่ยอบ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วค่าที่กำหนดตรงขอบทางเข้าจะเป็นค่าความเร็วและอุณหภูมิ

เงื่อนไขขอบทางออก (Outlet) เงื่อนไขที่กำหนดตรงขอบทางออก ส่วนใหญ่แล้วจะใช้เงื่อนไขของการไม่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรระหว่าง 2 จุดกริดที่อยู่ติดกันตรงบริเวณทางออก

เงื่อนไขขอบที่พื้นผิว (Wall) ส่วนใหญ่แล้วจะกำหนดให้ค่าของตัวแปรที่พื้นผิวมีค่าเท่ากับศูนย์

เงื่อนไขขอบที่ระนาบสมมาตร (Symmetry) เงื่อนไขขอบที่ระนาบสมมาตรคือ การกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรระหว่าง 2 จุดกริดที่อยู่ติดกันตรงบริเวณระนาบสมมาตร และกำหนดให้ความเร็วที่มีทิศตั้งฉากกับระนาบสมมาตรมีค่าเท่ากับศูนย์ตรงขอบของระนาบสมมาตร

2. ขั้นตอนการคำนวณ (Analysis)

2.1 การจัดรูปสมการให้เหมาะสมกับปัญหาที่กำลังพิจารณา

ขั้นตอนนี้คือการจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับสถานการณ์ที่กำลังพิจารณาอยู่

2.2 การทำให้สมการมีรูปแบบไม่ต่อเนื่อง

การทำให้สมการมีรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (Discretisation) คือการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเป็นสมการที่มีรูปแบบต่อเนื่องให้เป็นสมการเชิงพีชคณิต (Algebraic Equations) ที่มีรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ วิธีการทำให้สมการไม่ต่อเนื่องมีอยู่หลายวิธีในปัจจุบัน แต่วิธีที่เป็นที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวของไหลและการถ่ายเท

ความร้อน คือ วิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์เท่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง ทั้งนี้สมการการเคลื่อนที่ทางของไหล และการถ่ายเทความร้อนมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มากกว่าสมการของกลศาสตร์ของแข็งอยู่แล้ว เนื่องจากพจน์การพาในสมการมีลักษณะไม่เชิงเส้น และความไม่เชิงเส้นนี้จะเด่นชัดขึ้น เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังนั้นวิธีปริมาตรจำกัดซึ่งมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์น้อยกว่าจึงเป็นที่นิยมใช้กับปัญหาทางของไหลและการถ่ายเทความร้อนมากกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนี้วิธีปริมาตรจำกัดเป็น วิธีที่ถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่เป็นไปตามกฎอนุรักษ์ (Conservation Laws) จึงทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการแก้สมการทางของไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการกฏทรงมวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน

2.3 การหาผลเฉลย

วิธีการหาผลเฉลย คือการแก้ระบบสมการพีชคณิต หรือ ระบบสมการปริมาตรจำกัดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ต่าง ๆ เช่น ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบตรง (Direct Methods) และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ (Iterative Methods) โดยวิธีการหาผลเฉลยที่นิยมใช้ในการแก้ระบบสมการพีชคณิตใน CFD คือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ เนื่องจากวิธีนี้ใช้หน่วยความจำในการคำนวณน้อยกว่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบตรงมากโดยรายละเอียดของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่างๆสามารถศึกษาได้จากหนังสือทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยทั่วไป

2.4 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาผลเฉลยจากสมการพีชคณิต เป็นส่วนที่ช่วยให้การหาผลเฉลยได้เร็วขึ้นและทำให้สามารถคำนวณปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนข้อมูลมากได้ โดยภาษาทางคอมพิวเตอร์ที่เป็นที่นิยมในการใช้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทาง CFD เช่น ภาษา Fortran, ภาษา C และ โปรแกรม Matlab เป็นต้น

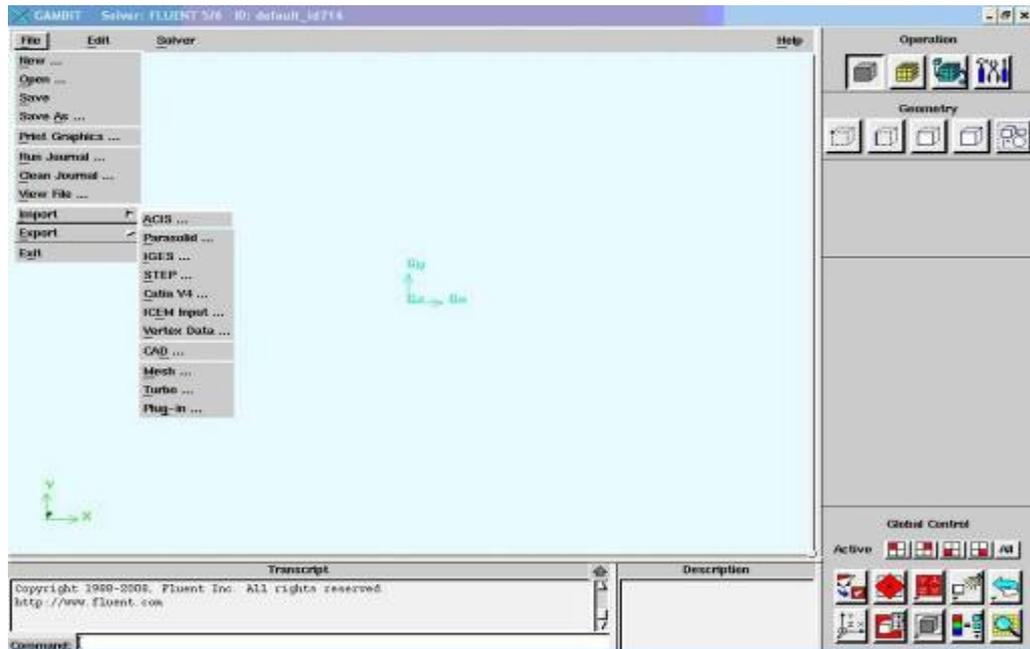
3. ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processing)

ขั้นตอนนี้คือการแสดงผลการคำนวณจากชุดข้อมูลดิบที่ได้มาจากการแก้ระบบสมการพีชคณิตด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำนั้นมาแสดงในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลชัดเจนขึ้น โดยซอฟต์แวร์ CFD ที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่สามารถแสดงผลได้ในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่จะนำข้อมูลนั้นไปใช้งาน เช่น เวกเตอร์ (Vector) ของความเร็วภายในบริเวณขอบเขตที่พิจารณาเพื่อแสดงทิศทางของการไหล , คอนทัวร์ (Contour) ซึ่งแสดงค่าเป็น ลักษณะลำดับสีที่เท่ากันของความเร็วหรือความดัน หรือ เส้นกราฟ (Graph) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ CFD ยังพัฒนาเครื่องมือต่างๆ ในการแสดงผล เช่น สามารถแสดงผลทีละระนาบ และสามารถย่อขยายหรือหมุนในส่วนบริเวณที่สนใจได้ (วารสาร, 2548)

โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์

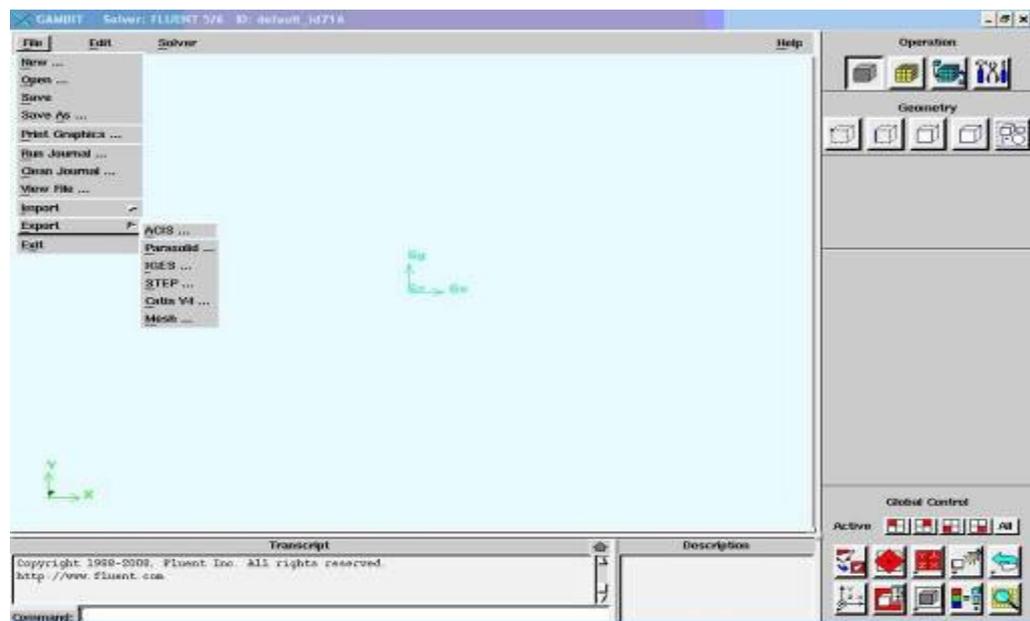
1. โปรแกรม GAMBIT

เป็นโปรแกรมช่วยผู้ออกแบบและนักวิเคราะห์ ในการสร้างแบบจำลองและกริดสำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และโปรแกรมประยุกต์อื่นๆ ซึ่ง โปรแกรม GAMBIT สามารถใช้งานผ่าน Graphical user interface (GUI) ซึ่งช่วยให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้โปรแกรม GAMBIT สามารถรับข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น ACIS ,Parasolid ,IGES,STEP,Catia V4,ICEM Input,Vertex Data,CAD,Mesh,Turbo หรือ Plug-in อื่นๆ ดังภาพที่ 29



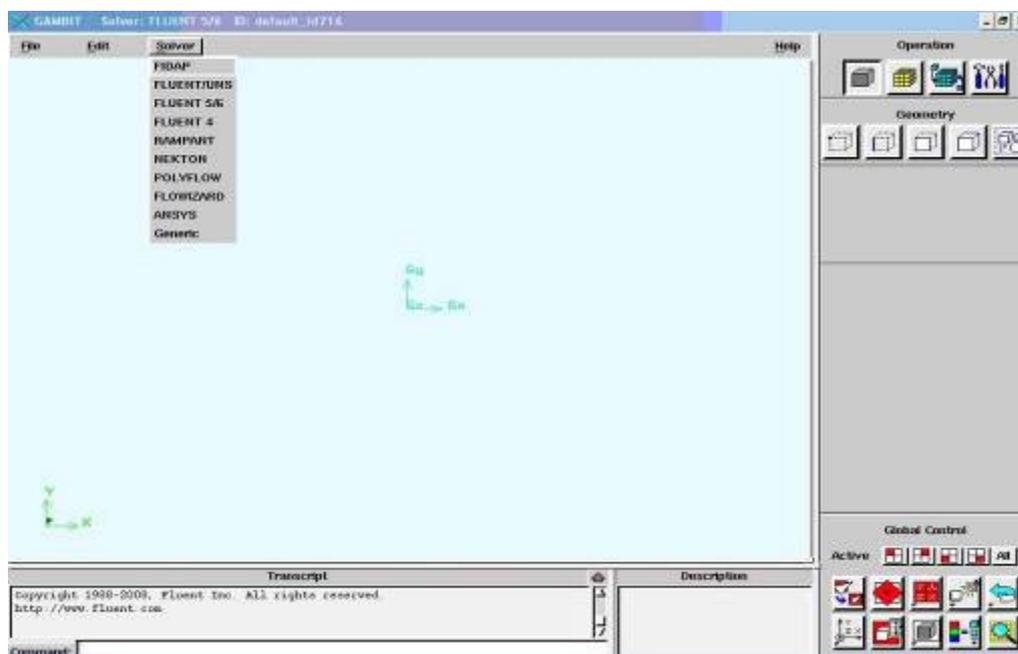
ภาพที่ 29 แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการ Import ข้อมูล

และยังสามารถส่งออกข้อมูลได้หลายรูปแบบเช่นกัน เช่น ACIS ,Parasolid ,IGES ,STEP และ Catia V4 ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการ Export ข้อมูล

โปรแกรม GAMBIT ใช้งานได้กับโปรแกรมวิเคราะห์หลายโปรแกรม เช่น FIDAP, FLUENT, RAMPANT, NEKTON, POLYFLOW, FLOWIZARD, ANSYS และ Generic ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 แสดงหน้าจอของโปรแกรม GAMBIT ส่วนการใช้งานกับ Solver

2. โปรแกรม FLUENT

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประยุกต์ด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เขียนบนภาษา C ใช้สำหรับจำลองรูปแบบการไหลของของไหลและถ่ายเทความร้อนในรูปแบบที่ซับซ้อน โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการทำให้สมการมีรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (Discretisation)

ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ใช้พื้นฐานของ Integral Form ของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) เป็นจุดเริ่มต้น และพื้นที่คำนวณถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรย่อยๆ ขนาดเล็ก เรียกว่าปริมาตรควบคุม (Control Volume) ปริมาตรควบคุมทั้งหมดถูกคำนวณโดยใช้สมการอนุพันธ์ (Differential Equation) ในรูปแบบอินทิกรัล (Integral Form) ผ่านจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละปริมาตร หลังจากนั้นตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการค่าจะถูกประมาณค่า (Interpolation) จากจุดศูนย์กลางปริมาตรไปยังพื้นที่ทั้งหมดด้าน หรือก็คือจุดต่อของแต่ละปริมาตร

ควบคุมนั่นเอง ด้วยเหตุนี้เองทำให้การคำนวณไม่ต้องอ้างอิงจากพิกัดอ้างอิง เช่น พิกัดฉากหรืออื่นๆ เป็นต้น

โปรแกรม FLUENT ทำการ Discrete สมการควบคุมให้เป็นสมการพีชคณิตให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถคำนวณเชิงตัวเลขได้ โดยใช้เทคนิคของปริมาตรควบคุม กล่าวคือ สมการควบคุมจะถูกอินทิเกรตที่แต่ละปริมาตรควบคุม ผลที่ได้เป็นสมการพีชคณิตที่ยังคงกฎการอนุรักษ์

FLUENT เป็นโปรแกรมที่ยืดหยุ่นให้สามารถออกแบบกริดได้อย่างสมบูรณ์ สามารถแก้ไขปัญหาการไหลด้วยกริดที่ไม่มีรูปแบบซึ่งสร้างขึ้นมาจากรูปทรงที่ซับซ้อน รองรับรูปแบบกริดทั้งสองมิติ (2D) แบบสามเหลี่ยม (Triangular) หรือแบบรูปสี่ด้าน (Quadrilateral) ส่วนรูปแบบกริดสามมิติ (3D) นั้น สามารถรองรับได้ทั้งรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงหกเหลี่ยม (Hexahedral) รูปทรงปิระมิด (Pyramid) รูปคี่ม (Wedge) และรูปทรงผสม (Hybrid) นอกจากนี้ FLUENT ยังยอมให้ปรับปรุงหรือเพิ่มความละเอียดบนกริดได้บนพื้นฐานของวิธีการแก้ปัญหของการไหลนั้น

2.1 รูปแบบโครงสร้างของโปรแกรม (Program Structure)

รูปแบบโครงสร้างของโปรแกรมเป็นไปตามภาพที่ 32 ส่วนการใช้งานสามารถสร้างรูปทรงและกริดโดยใช้โปรแกรม GAMBIT นอกจากนี้ยังสามารถใช้โปรแกรม TGRID สำหรับสร้างกริดรูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular) รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) หรือรูปทรงปริมาตรผสมผสาน (Hybrid Volume) จากกริดขอบเขตที่มีอยู่แล้ว (ซึ่งสามารถสร้างมาจาก GAMBIT หรือโปรแกรมประยุกต์ CAD/CAE)

นอกจากนี้ยังสามารถสร้างกริดได้จากโปรแกรม ANSYS (Swanson Analysis System, Inc.), CGNS (CFD general notation system), I-DEAS (SDRC), MSC/ARIES หรือ MSC/PATRAN หรือ MSC/NASTRAN (MacNeal-Schwendler Corporation) ได้อีกด้วย

2.2 ความสามารถของโปรแกรม (Program Capabilities)

FLUENT เหมาะสำหรับการไหลของของไหลแบบอัดตัวไม่ได้และอัดตัวได้ในรูปทรงที่ซับซ้อน นอกจากนี้ FLUENT ยังรองรับโปรแกรมการแก้ไขปัญหาการไหลที่ระบุรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน และรูปแบบการไหลของลักษณะทางกายภาพที่หลากหลายที่รวมอยู่ด้วยกัน ซึ่ง FLUENT มีความสามารถในการจำลองรูปแบบเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาได้หลายรูปแบบ ดังนี้

2.2.1 การไหลแบบสองมิติบนระนาบ (2D planar flow), การไหลแบบสองมิติแบบสมมาตรตามแนวแกน (2D axisymmetric with swirl flow หรือ rotationally symmetric flow) รวมทั้งการไหลแบบสามมิติ (3D flow)

2.2.2 การวิเคราะห์กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (Quadrilateral) รูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular) รูปทรงหกเหลี่ยมแบบเรียงสลับ (Hexahedral (Brick)) รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงปริซึมหรือค้อน (Prism หรือ Wedge) รูปทรงปิระมิด (Pyramid) และองค์ประกอบกริดแบบผสมผสาน (Mixed element meshes)

2.2.3 การไหลแบบไม่ขึ้นกับเวลา (Steady-state flow) และ การไหลที่ขึ้นกับเวลา (Transient flow)

2.2.4 การไหลแบบไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible flow) หรือ แบบอัดตัวได้ (Compressible flow) ที่ทุกระดับความเร็ว เช่น ความเร็วต่ำกว่าเสียง (Low subsonic) ความเร็วระดับเดียวกับเสียง (Transonic) ความเร็วเหนือเสียง (Supersonic) และความเร็วที่สูงกว่าเสียงเกินห้าเท่า (Hypersonic)

2.2.5 การไหลแบบไม่มีความหนืด (Inviscid flow) การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

2.2.6 การไหลแบบ Newtonian และ non-Newtonian

2.2.7 การถ่ายเทความร้อน ซึ่งรวมทั้งการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) และการพาความร้อนแบบผสม (Mixed convection) การนำความร้อนผ่านของแข็งหรือของไหล (Conjugate (Solid/Fluid) Heat transfer) และการถ่ายเทรังสีความร้อน (Radiation)

2.2.8 ปฏิกริยาหรือกระบวนการผสมทางเคมี (Chemical species mixing and reaction) ซึ่งรวมทั้งรูปแบบการเผาไหม้ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous combustion model) และที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous combustion model) และรูปแบบการสะสมหรือเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว (Surface deposition/reaction model)

2.2.9 การไหลของก๊าซ-ของเหลว, ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ที่มีรูปแบบการไหลแบบอิสระที่พื้นผิว หรือหลายสถานะ (Free surface and multiphase models for gas-liquid, gas-solid, and liquid-solid flows)

2.2.10 การคำนวณแนววิถีแบบลากรางีเยนสำหรับเฟสการกระจาย (อนุภาค, รูปหยด, ฟอง) รวมถึงการคาบเกี่ยวต่อเนื่องระหว่างเฟสด้วย (Lagrangian trajectory calculation for dispersed phase (particles/droplets/bubbles), including coupling with continuous phase)

2.2.11 แบบจำลองการเกิดคาวิเตชัน (Cavitation model)

2.2.12 แบบจำลองการเปลี่ยนสถานะสำหรับการหลอมละลายหรือการกลายเป็นของแข็ง (Phase change model for melting/solidification applications)

2.2.13 วัสดุพรุนที่เป็น non-isotropic permeability, สภาวะที่มีความต้านทานแบบเฉื่อย (Inertial resistance), การนำความร้อนผ่านของแข็ง (Solid heat conduction), สภาวะการเกิดความดันแบบก้าวกระโดดบนพื้นผิววัสดุพรุน (Porous-face pressure jump conditions)

2.2.14 แบบจำลองพารามิเตอร์แบบกลุ่ม (Lumped parameter models) สำหรับพัลส์, ปั๊ม, ไบพัส และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2.15 กรอบอ้างอิงแบบมีความเฉื่อย หรือแบบไม่เคลื่อนที่ (Inertial (Stationary) reference frame) และกรอบอ้างอิงแบบไม่มีความเฉื่อย หรือแบบเคลื่อนที่ (non-inertial (rotating or acceleration) reference frame)

2.2.16 กรอบอ้างอิงผสม (Multiple reference frame หรือ MRF) และสามารถเลือกกริดแบบเลื่อนได้ (Sliding mesh options) สำหรับแบบจำลองที่มีกรอบการเคลื่อนที่แบบผสม (Modeling multiple moving frame)

2.2.17 แบบจำลองระนาบผสม (Mixing-plane model) สำหรับจำลองการทำงานของ Rotor-stator ,การแปลงแรงบิด (Torque converters) และอุปกรณ์แบบ Turbomachinery ที่คล้ายคลึงกัน โดยการที่สามารถเลือกรูปแบบได้ว่าเป็นการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) หรือการอนุรักษ์แบบหมุนวน (Swirl conservation)

2.2.18 แบบจำลองกริดพลศาสตร์ (Dynamic mesh model) สำหรับการจำลองขอบเขตที่มีกริดเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Moving and deforming mesh)

2.2.19 ปริมาตรแหล่งกำเนิดมวล โมเมนตัม ความร้อน และอนุภาคทางเคมี (Volumetric sources of mass ,momentum,heat, and chemical species)

2.2.20 ฐานข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ (Material property database)

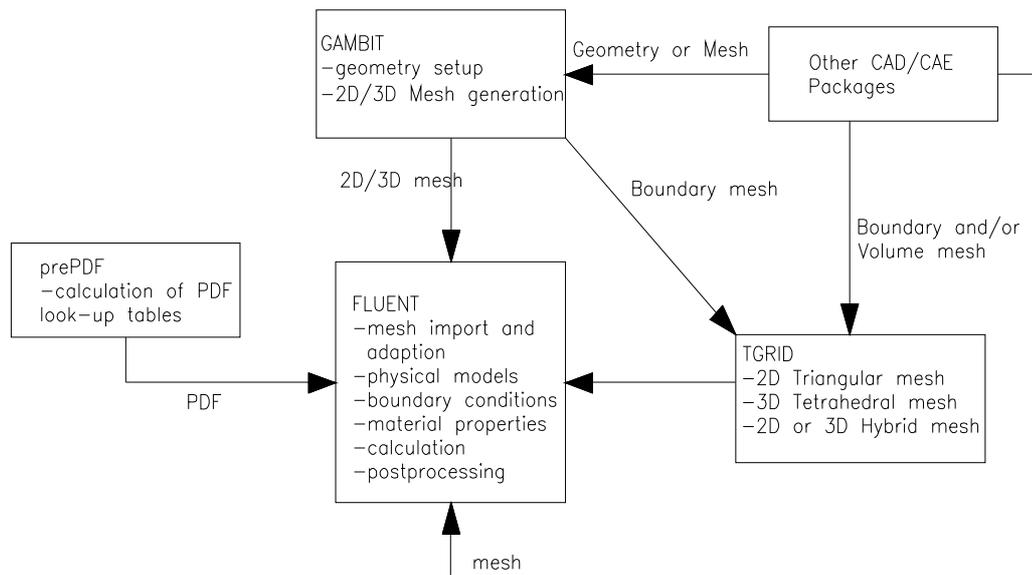
2.2.21 รองรับการทำงานบน User-defined functions]

2.2.22 สนับสนุน Dynamic (Two-way) coupling โดย GT-Power and WAVE

2.2.23 รองรับ Acoustic Module (สนับสนุนด้วยเอกสารเท่านั้น)

2.2.24 รองรับ Magnetohydrodynamics (MHD) module (สนับสนุนด้วยเอกสารเท่านั้น)

2.2.25 รองรับ Continuous fiber module (สนับสนุนด้วยเอกสารเท่านั้น)



ภาพที่ 32 แสดงโครงสร้างของโปรแกรม FLUENT (Basic Program Structure)

สมการการเคลื่อนที่ของการไหล

การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนจาก NGR ไปยังอากาศโดยรอบเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คิดผลจากผนังของตู้ที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) การเกิดความร้อนสะท้อนกลับของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Wall radiation) และขนาดตู้ (Sizing) ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำตู้ (Material) สีที่ใช้ทำตู้ (Painting and Finishing)

กำหนดการไหลของอากาศภายใน กำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่สภาวะคงตัว (Steady) แบบอัดตัวไม่ได้ในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ ซึ่งมีสมการควบคุมที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) สมการกฏทรงมวล (Continuum equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

2) สมการโมเมนตัม (Momentum Equations)

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

3) สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (4)$$

4) สมการ k-ε มาตรฐานสำหรับการไหลปั่นป่วน (Standard k-ε model)

แบบจำลองการปั่นป่วนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วยสมการ 2 สมการ แสดงการเคลื่อนที่แบบพิเศษที่แสดงถึงคุณสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วน โดยพิจารณาถึงผลกระทบ เช่น การพาและการแพร่แบบปั่นป่วนของพลังงาน ตัวแปรของการเคลื่อนที่ที่พิจารณาถึงหลักๆ มี 2 ตัวแปรคือ Turbulent kinetic energy ที่จะบ่งบอกถึงพลังงานของความปั่นป่วน และ dissipation ที่จะแสดงให้เห็นถึงระดับความรุนแรงของความปั่นป่วนดังนี้

4.1) สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

4.2) สมการอัตราการแพร่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation Rate Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

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

และ Turbulent viscosity, μ_t หาได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{เมื่อ } C_\mu \text{ เป็นค่าคงที่}$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- 1.ตู้ Neutral Grounding Resistor
- 2.Data Acquisition MW-100 ของกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 3.หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 25 kVA ของ กองวิศวกรรมไฟฟ้าและทดสอบ, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 4.เครื่องคอมพิวเตอร์ CPU Pentium IV 3.0 GHz ,RAM 1 GB,Harddisk 250 GB.

วิธีการ

1.ขั้นตอนการทดลองภาคสนาม

เพื่อการศึกษาการร้อนขึ้นของ NGR ได้ทำการทดสอบภาคสนามโดยนำตู้ NGR ของสถานีไฟฟ้ามาบตาพุด 1 จ.ระยอง ที่ยังไม่ติดตั้งใช้งานมาทดสอบดังนี้

1.1 จ่ายกระแสต่อเนื่อง 40 แอมป์ แรงดัน 360 โวลต์ ผ่านตัว NGR โดยใช้หม้อแปลงทดสอบขนาด 25 kVA ตามภาพที่ 33 แล้ววัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งที่ NGR วัดอุณหภูมิที่ผิวของ NGR เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง การเก็บข้อมูลใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลคอมพิวเตอร์ Data Acquisition MW100 ตามภาพที่ 34 ช่วยในการเก็บข้อมูล ผลการทดลองเป็นไปตามภาพที่ 35

1.2 ป้อนกระแสต่อเนื่องที่ 25 A ให้กับ NGR ขนาด 12.7 โอห์ม ซึ่งเป็นขนาดที่กฟภ.ใช้งาน ในสภาพปกติ แล้ววัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดตั้งที่ NGR วัดอุณหภูมิที่ผิวของ NGR เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองเป็นไปตามภาพที่ 36



ภาพที่ 33 หม้อแปลงทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ขนาด 25 kVA



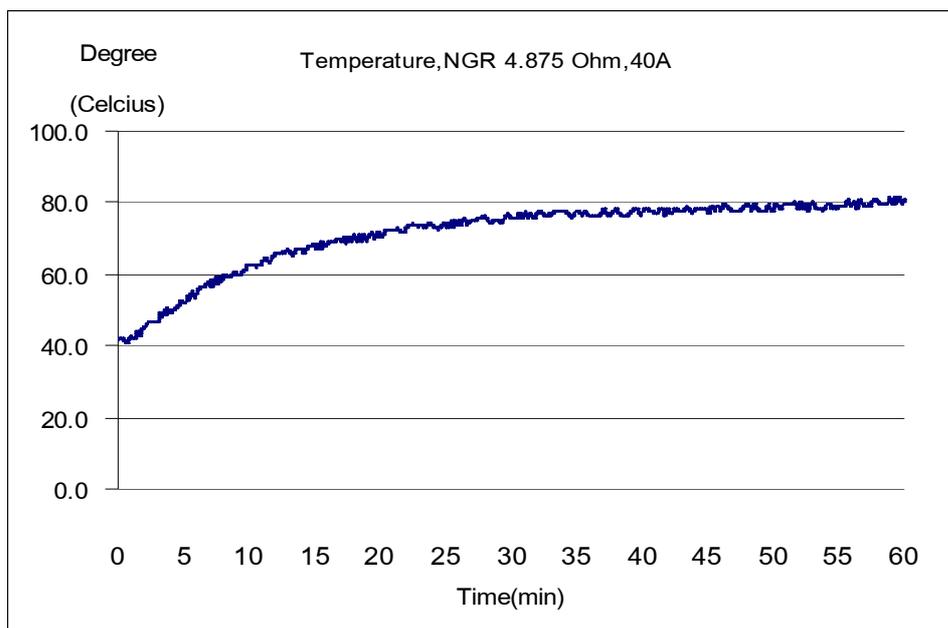
ภาพที่ 34 Data Acquisition (MW100)

2.การกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการตั้งค่าอุณหภูมิของตัว NGR

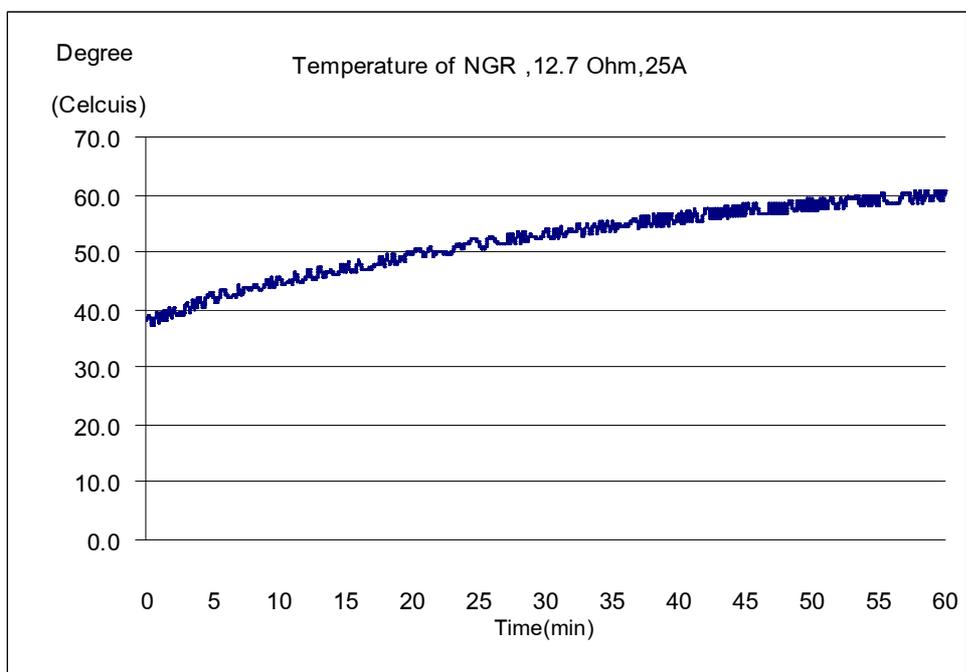
การกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการตั้งค่าอุณหภูมิของตัว NGR นั้น ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงการร้อนขึ้นของ NGR ซึ่งจากการทดลองเมื่อจ่ายกระแสต่อเนื่อง 40 แอมป์ แรงดัน 360 โวลต์ ผ่านตัว NGR โดยใช้หม้อแปลงทดสอบขนาด 25 kVA พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับกระแสที่จ่ายให้และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่กำหนด ดังแสดงตามกราฟในภาพที่ 35

จากผลการจ่ายกระแสให้กับตัว NGR อย่างต่อเนื่องคงที่จะเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของตัว NGR และจะเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไปโดยประมาณ 1 ชั่วโมง ดังนั้นในการตั้งค่าของอุณหภูมิของตัว NGR ในตู้ NGR ของแบบจำลองจะถูกตั้งค่าให้คงที่ที่ค่าๆหนึ่ง โดยค่าอุณหภูมิที่ใช้นั้นจะถูกพิจารณาจากการจ่ายกระแสขนาด 25 แอมป์ผ่าน NGR ขนาด 12.7 โอห์ม เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ซึ่งขนาดของกระแสไฟฟ้า 25 แอมป์นั้นเป็นค่ากระแสโดยเฉลี่ยอันเนื่องมาจากเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) ซึ่งผลการทดลองตามข้อ 1.2 ถูกแสดงในภาพที่ 36

ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ตัว NGR มีอุณหภูมิเฉลี่ยเป็น 60.9 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ค่าอุณหภูมิ 333.9 เคลวิน หรือ 60.9 องศาเซลเซียสในแบบจำลองของตัว NGR



ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัว NGR กับเวลาที่เปลี่ยนไป
เมื่อมีการจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องขนาด 40 แอมป์ 360 โวลต์

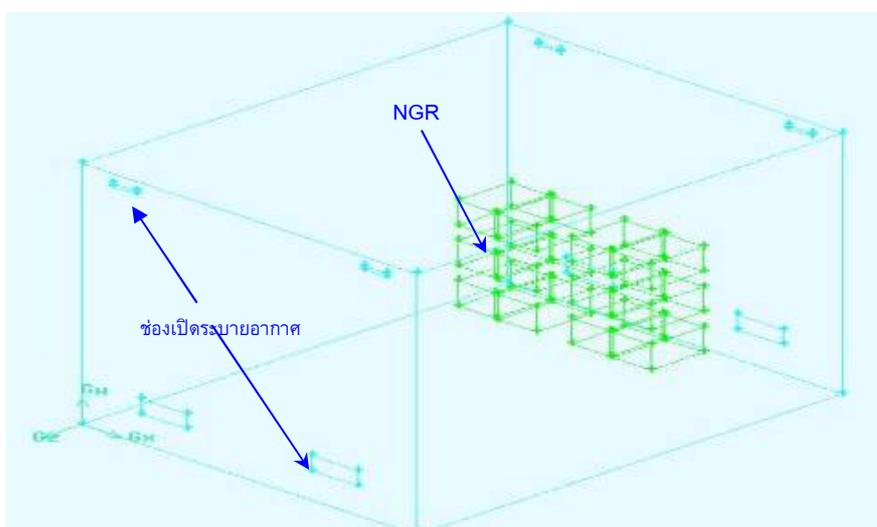


ภาพที่ 36 แสดงการร้อนขึ้นของ NGR ขนาด 12.7 โอห์ม เมื่อจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่อง
ขนาด 25 แอมป์

3. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

จำลองแบบตู้ NGR ผลิตภัณฑ์ UTAH กว้าง 2.2 เมตร ลึก 2.8 เมตร และสูง 2.6 เมตร โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ช่วยในการจำลองตามภาพที่ 37 ขนาดกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

ขนาดกริดเล็กที่สุด	1.53×10^{-4} ตารางเมตร
ขนาดกริดใหญ่ที่สุด	1.99×10^{-2} ตารางเมตร
จำนวนเซลล์ที่ใช้วิเคราะห์	89,864 เซลล์



ภาพที่ 37 แบบจำลองตู้ Neutral Grounding Resistor

4. ขั้นตอนการประมวลผล

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการกำหนดแบบจำลอง (Model)

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	Standard k-epsilon turbulence model
Wall Treatment	Standard Wall Functions
Heat Transfer	Enabled

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Model	Settings
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	None
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

ตารางที่ 2 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties) : aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	2719
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	871
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	202.4

ตารางที่ 3 ตารางแสดงคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties) :air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	ideal-gas	*
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	sutherland	()
Molecular Weight	kg/kmol	constant	28.966
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	K	constant	78.6

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Property	Units	Method	Value(s)
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom	-	constant	0
Speed of Sound	m/s	none	*

ตารางที่ 4 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions : Heat)

Condition	Value
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	0
Temperature (k)	333.90
Heat Flux (w/m ²)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m ² -k)	0

ตารางที่ 5 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions :Inlets)

Condition	Value
Gauge Pressure (pascal)	0
Backflow Total Temperature (k)	307.60

ตารางที่ 6 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions :Wall)

Condition	Value
Wall Thickness (m)	0
Heat Generation Rate (w/m ³)	0
Material Name	aluminum
Thermal BC Type	1

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Condition	Value
Temperature (k)	300
Heat Flux (w/m ²)	0
Convective Heat Transfer Coefficient (w/m ² -k)	0

ตารางที่ 7 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control :Equations)

Equation	Solved
Flow	Yes
Turbulence	Yes
Energy	Yes

ตารางที่ 8 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control :Pressure-Velocity Coupling)

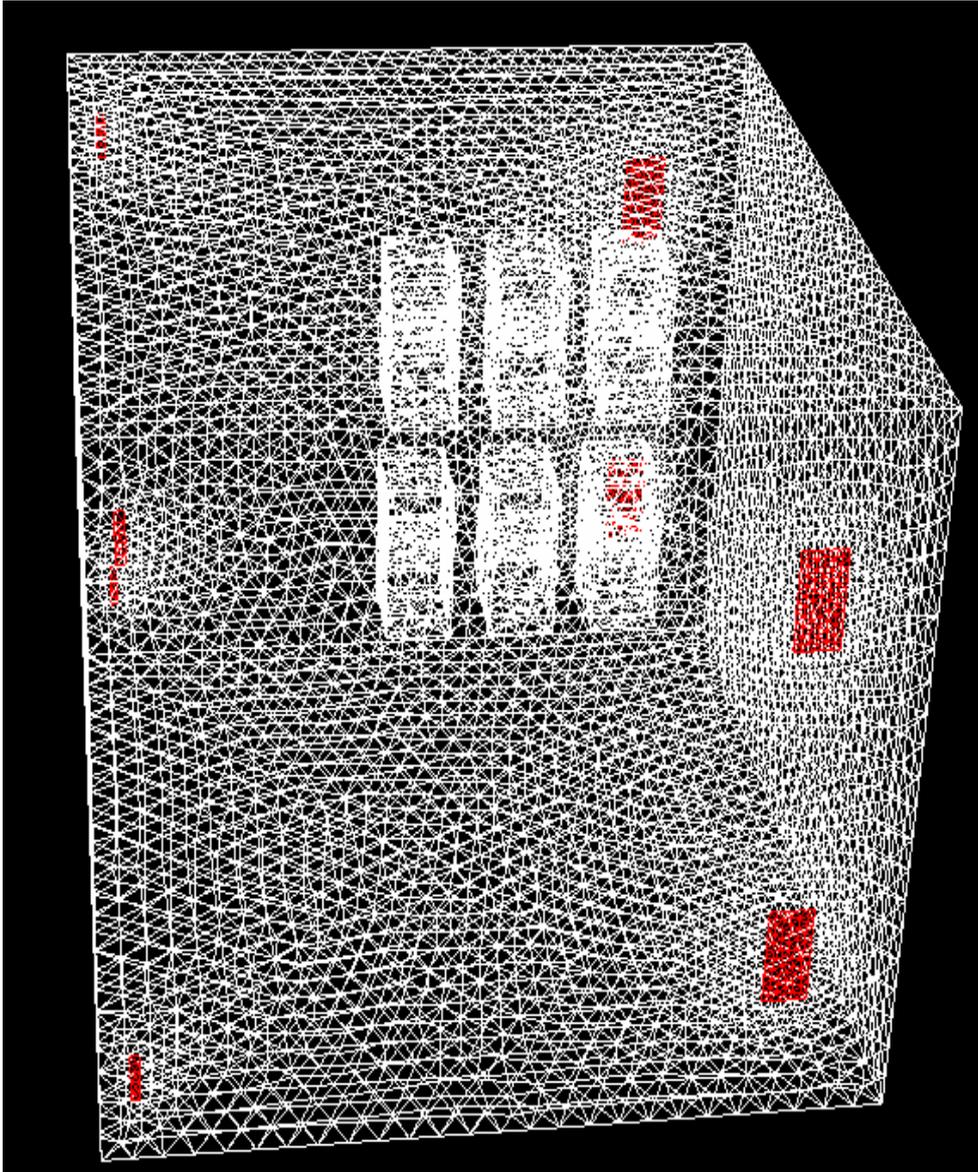
Parameter	Value
Type	SIMPLE

ตารางที่ 9 การควบคุมการแก้สมการ (Solver Control :Discretization Scheme)

Variable	Scheme
Pressure	Standard
Density	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind

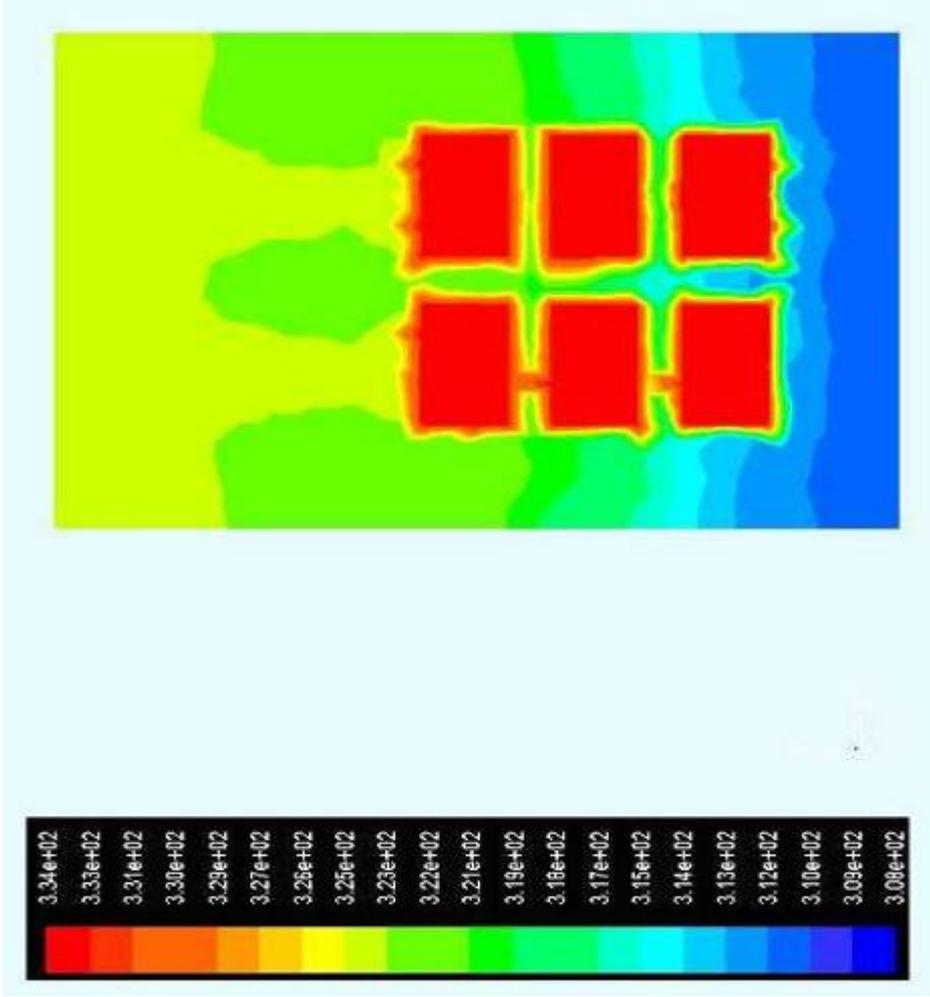
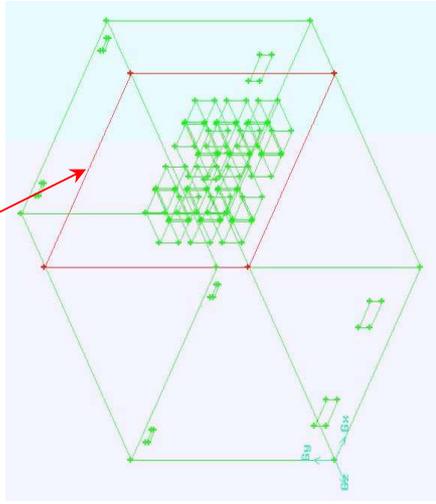
ผลและวิจารณ์

ผล



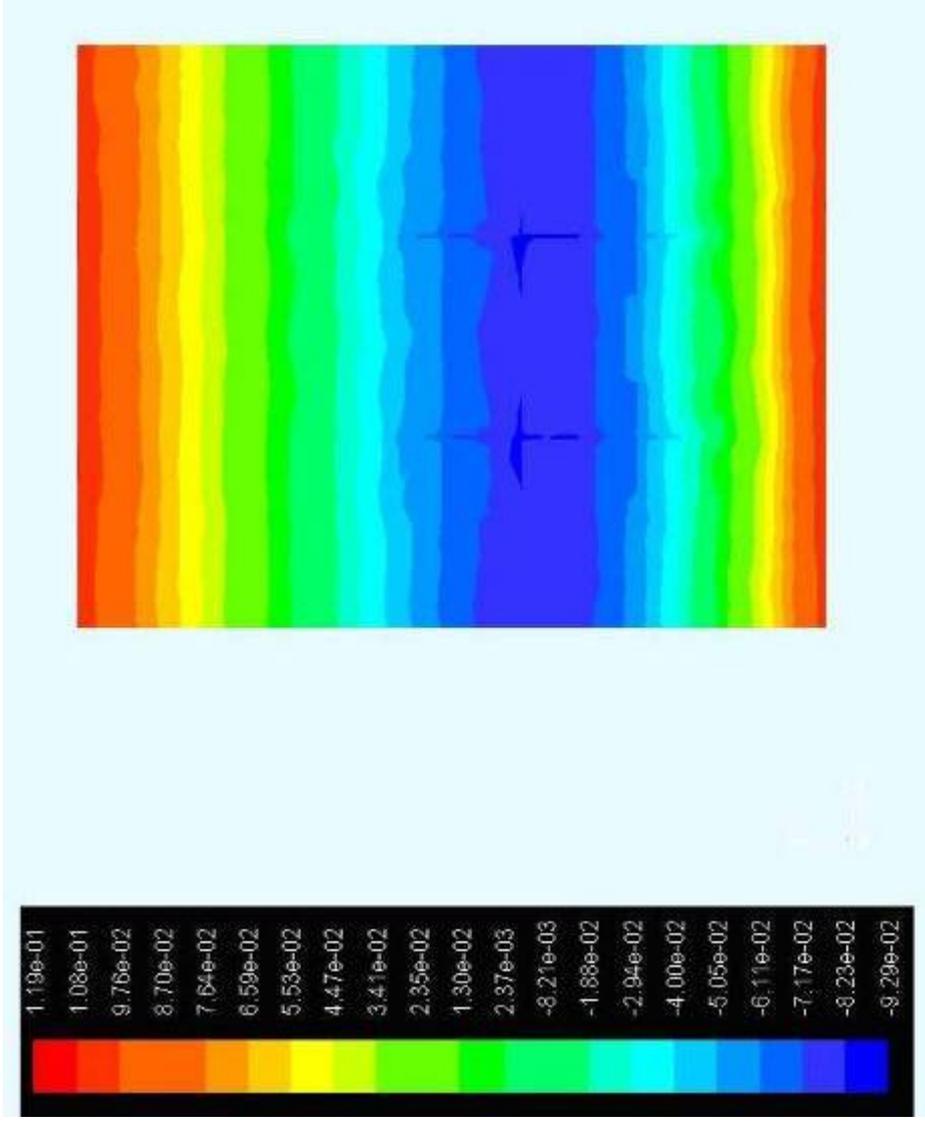
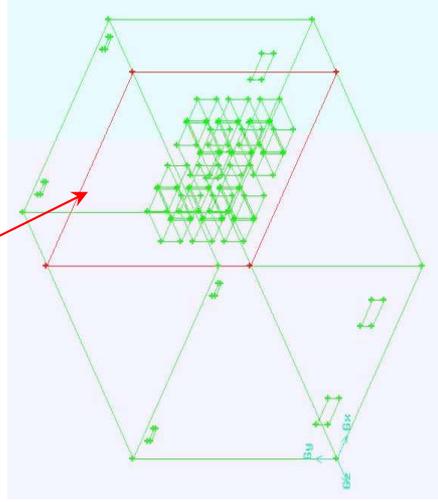
ภาพที่ 38 แสดงกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์(ไม่มีพัฒนา)

แนว ตัด Section Plain 1



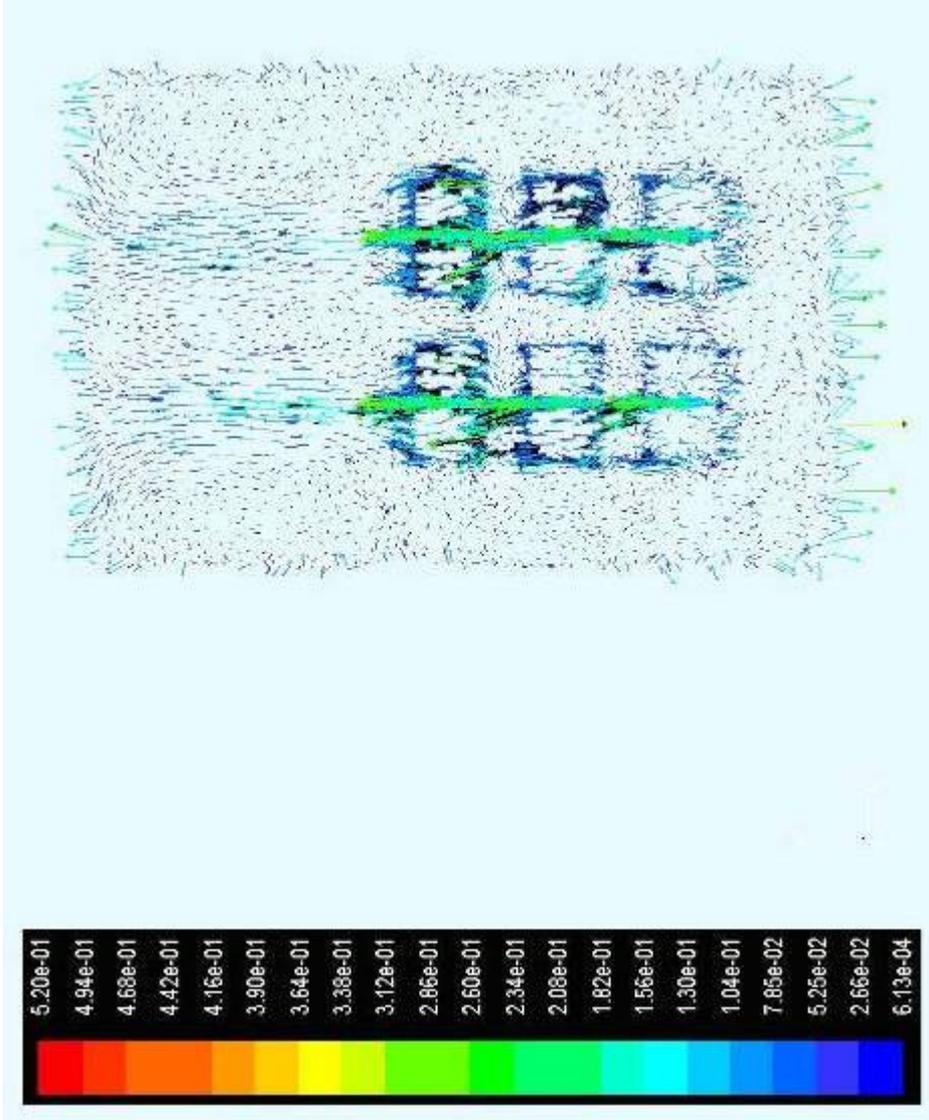
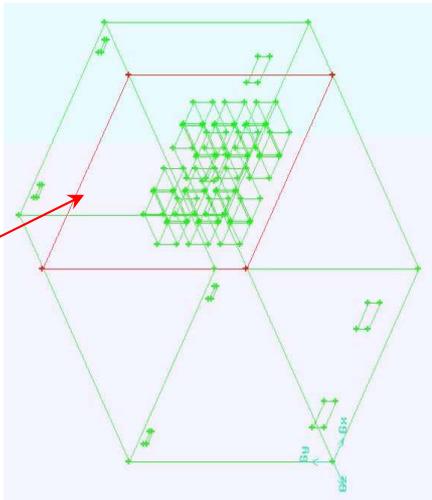
ภาพที่ 39 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR

แนวตัด Section Plain 1



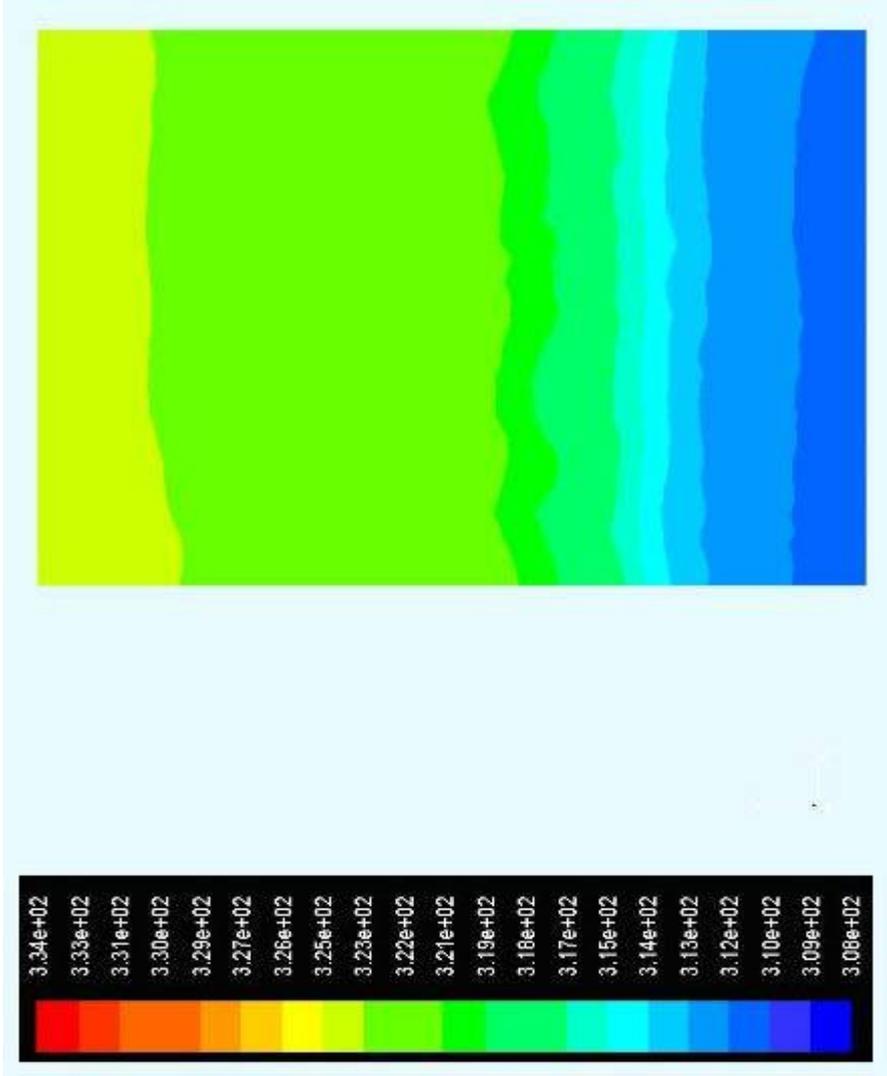
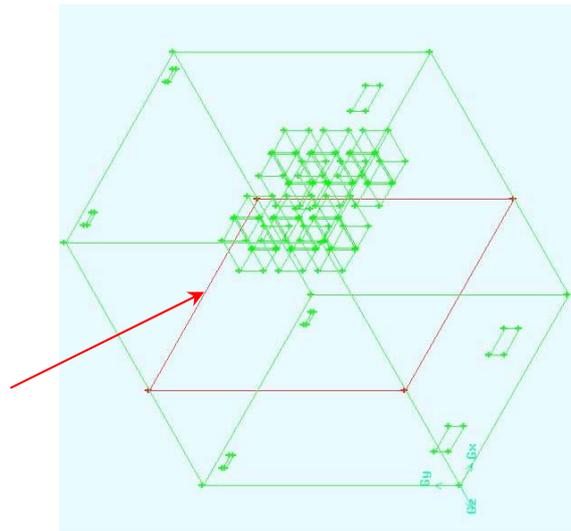
ภาพที่ 40 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR

แนวตัด Section Plain 1



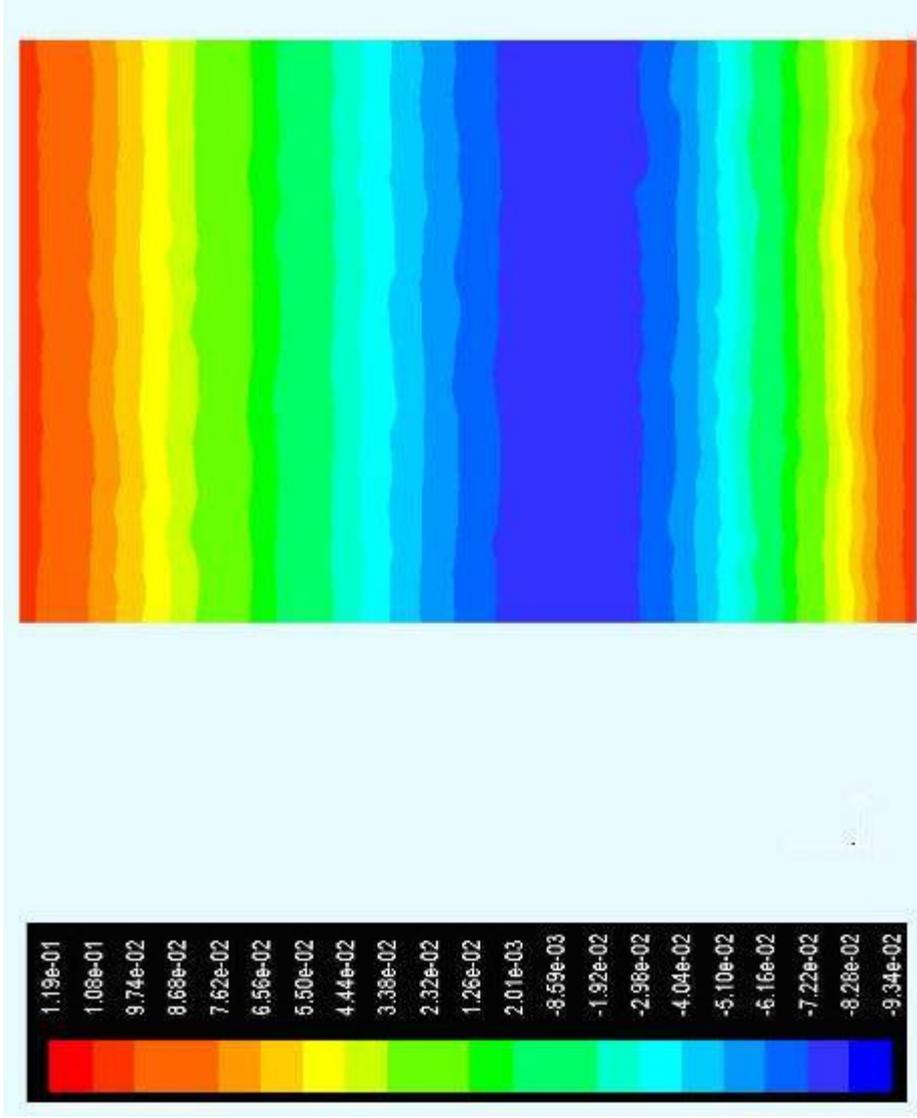
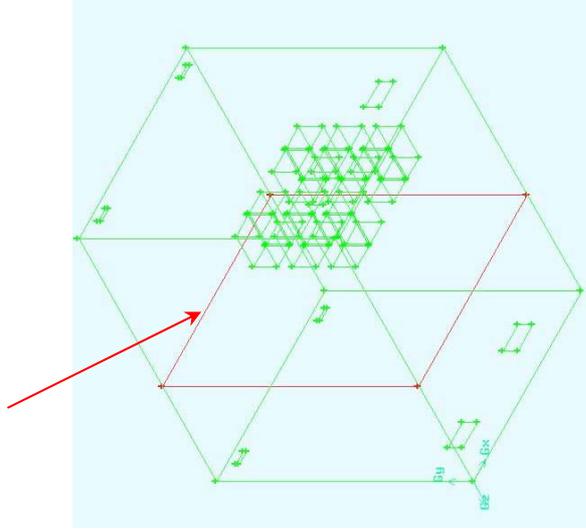
ภาพที่ 41 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 1 บริเวณตำแหน่ง NGR

แนว ตัด Section Plain 2



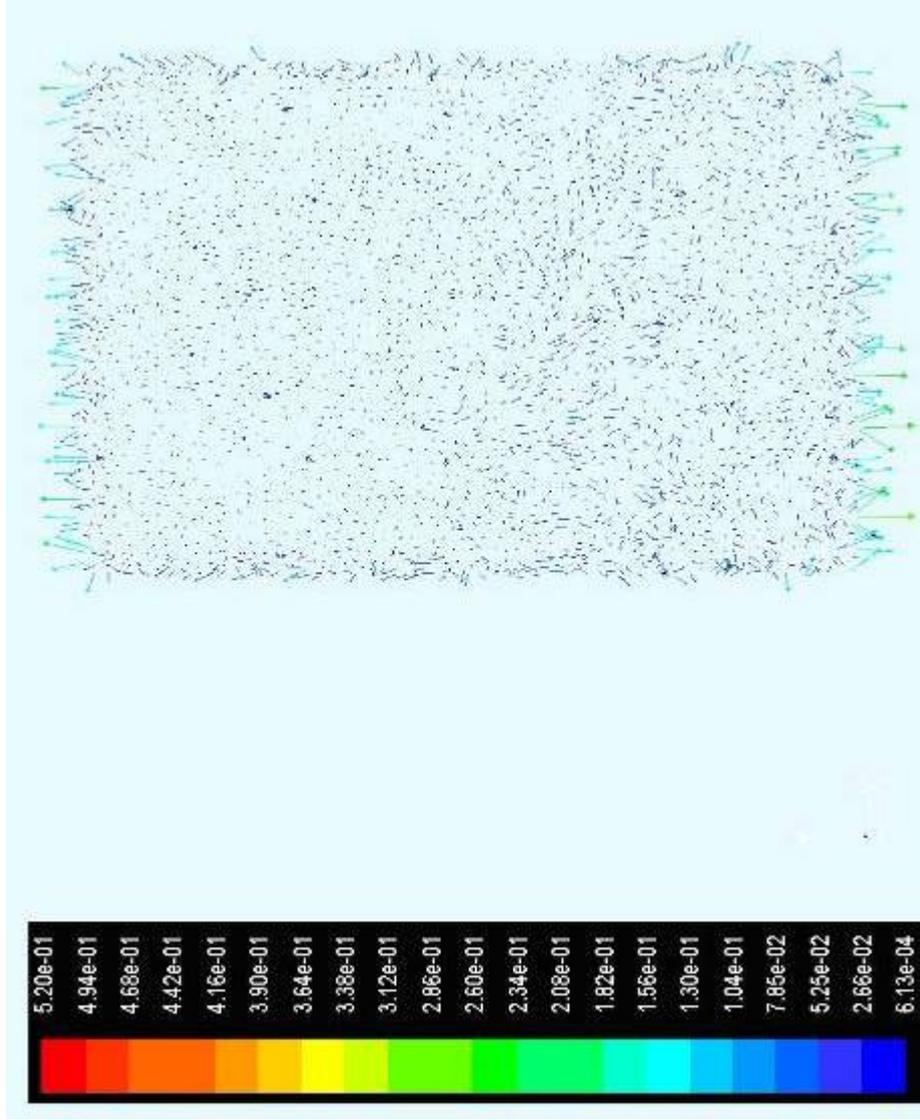
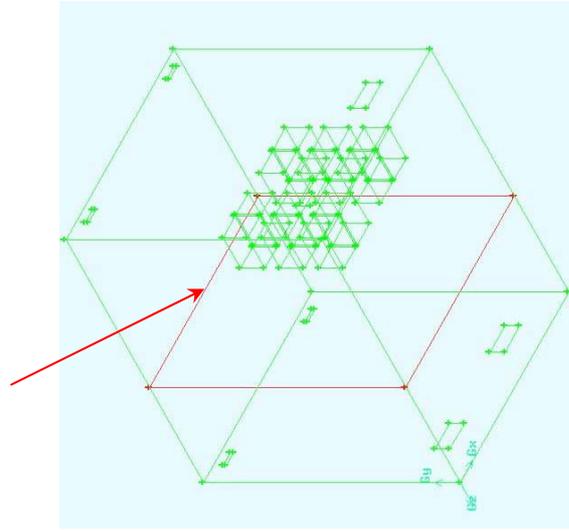
ภาพที่ 42 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 2

แนว ตัด Section Plain 2



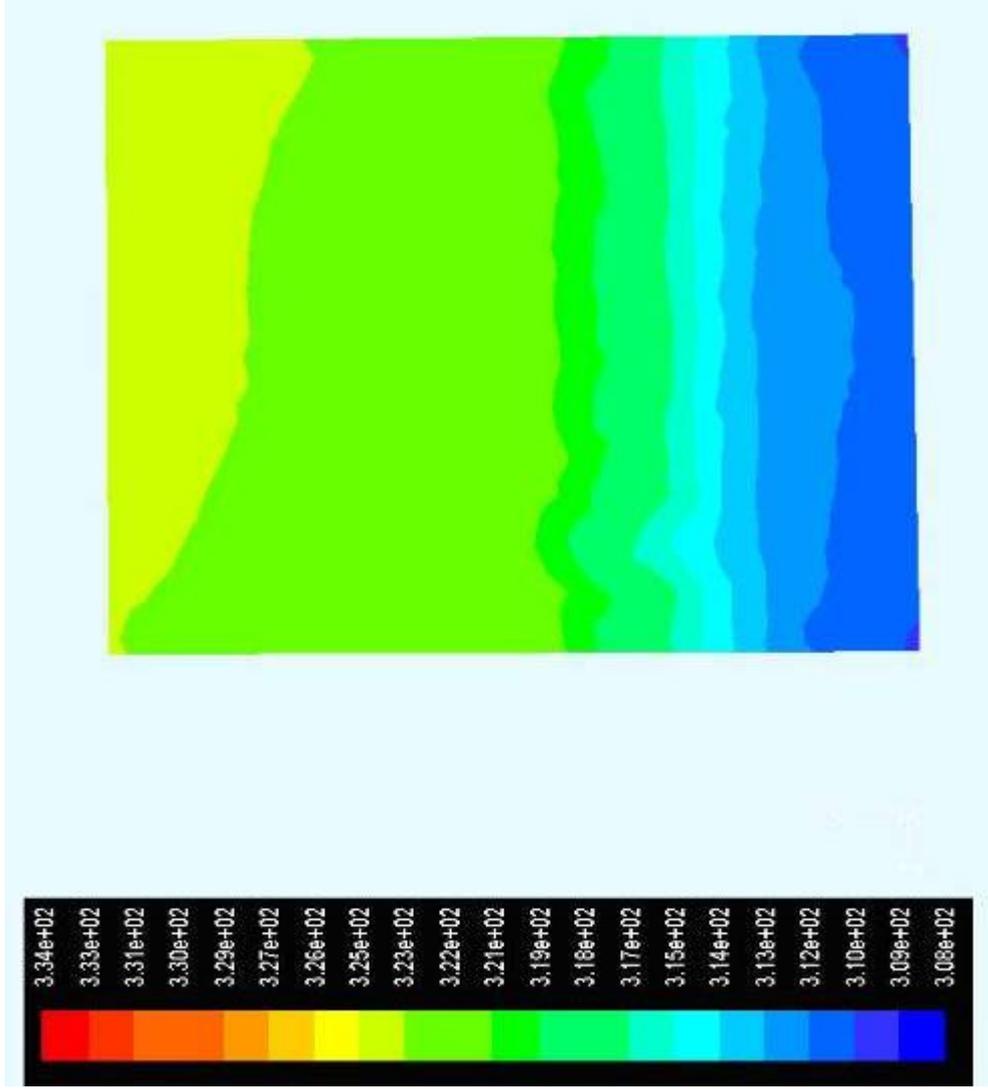
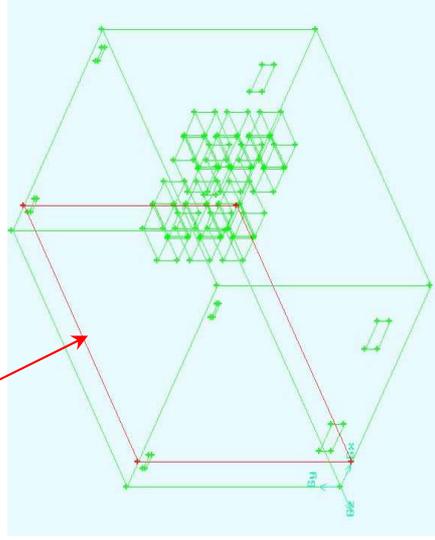
ภาพที่ 43 แสดงการกระจายตัวของความดันภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 2

แนวตัด Section Plain 2



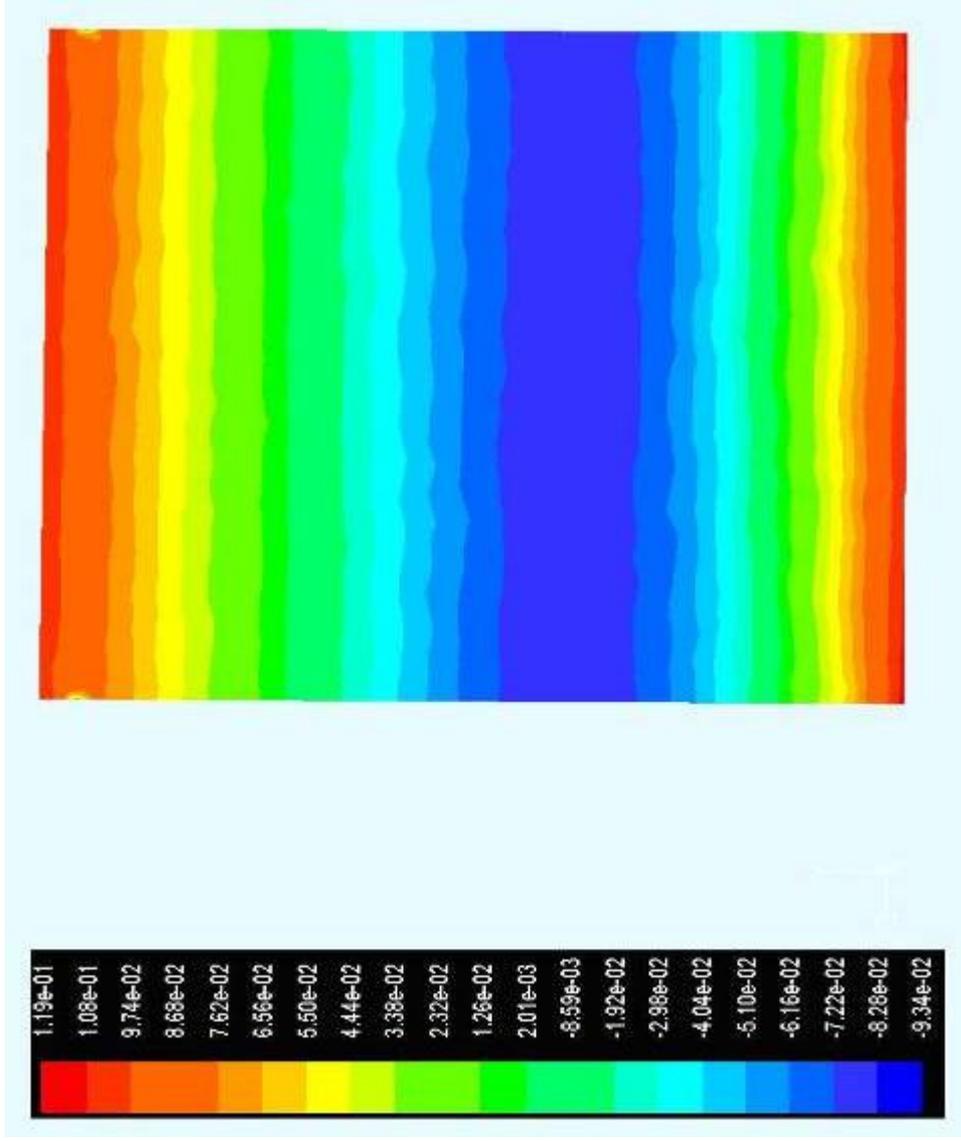
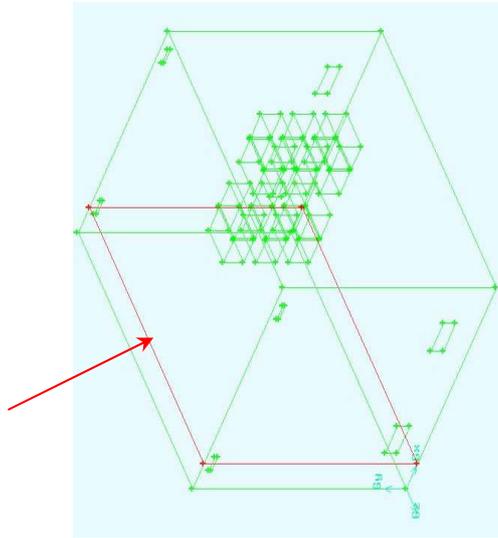
ภาพที่ 44 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 2

แนว ตัด Section Plain 3



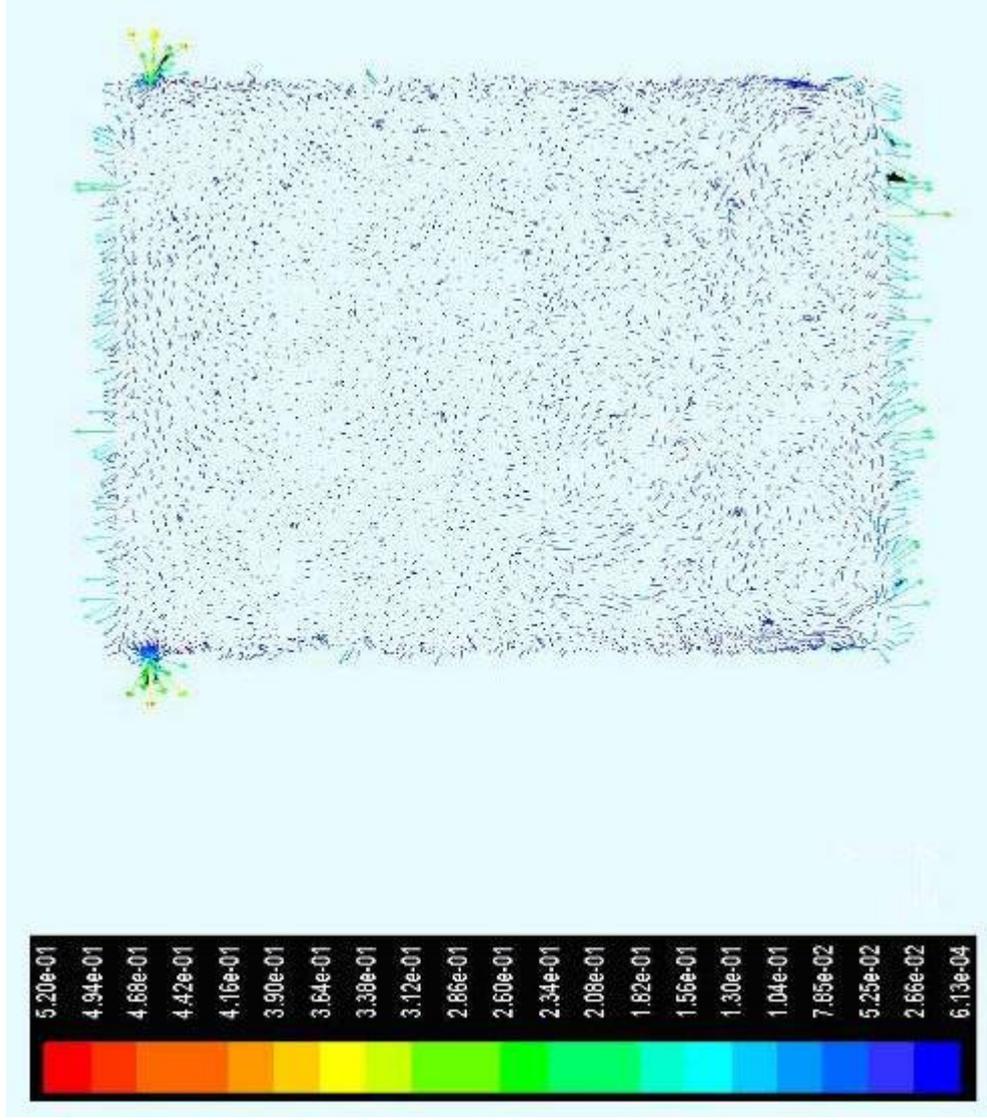
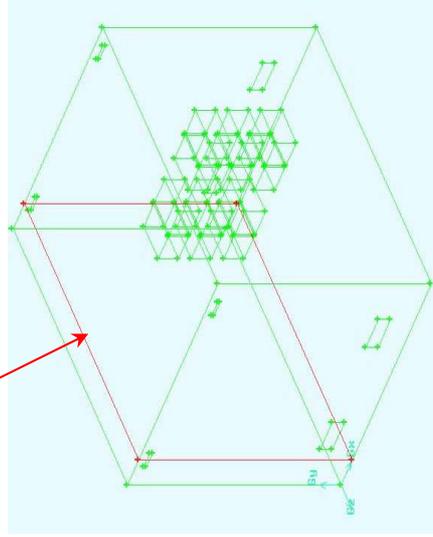
ภาพที่ 45 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 3

แนวตัด Section Plain 3



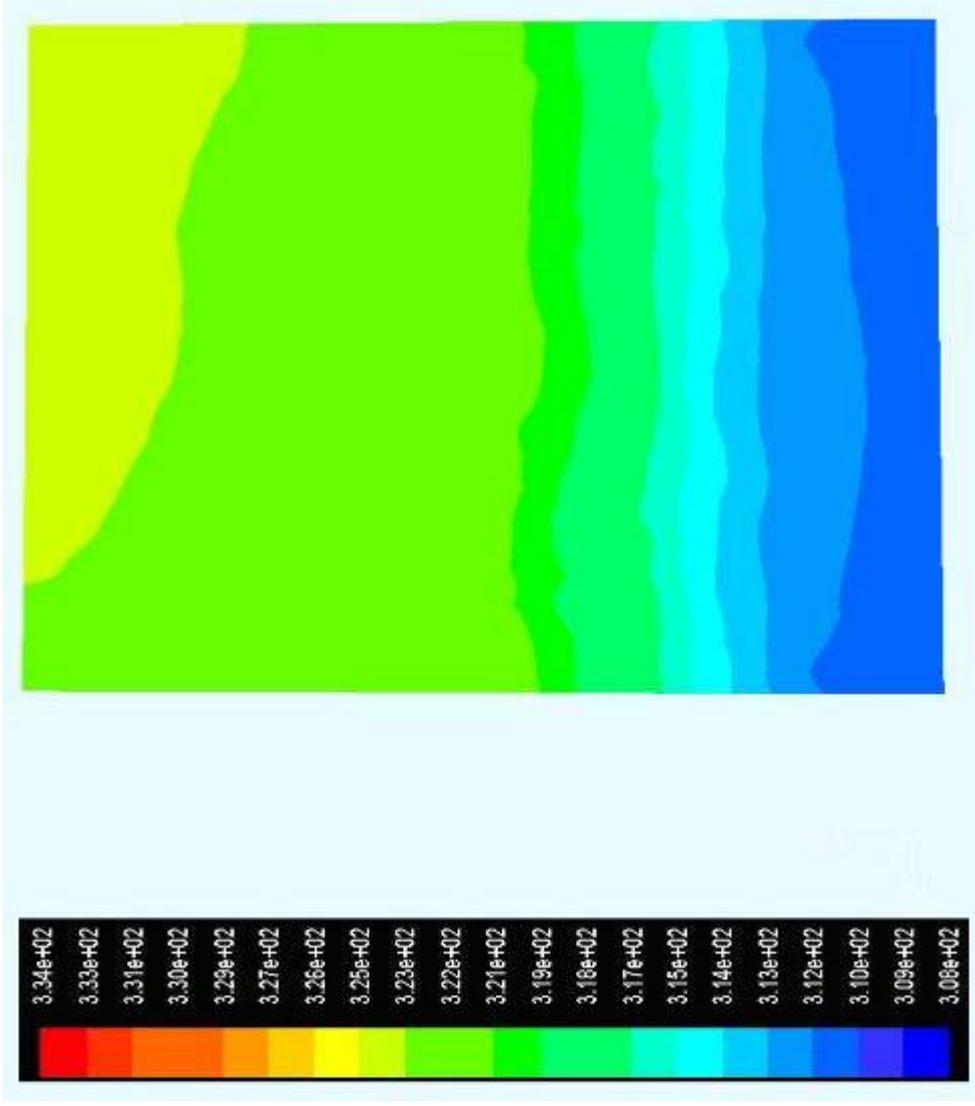
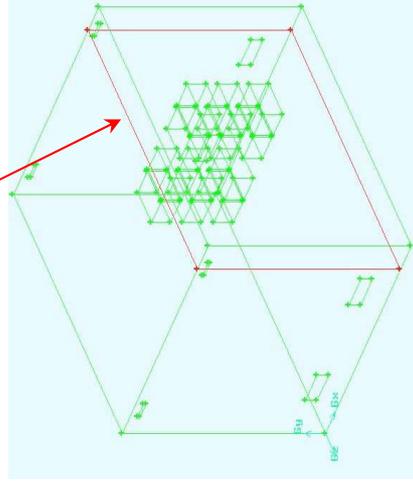
ภาพที่ 46 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 3

แนวตัด Section Plain 3



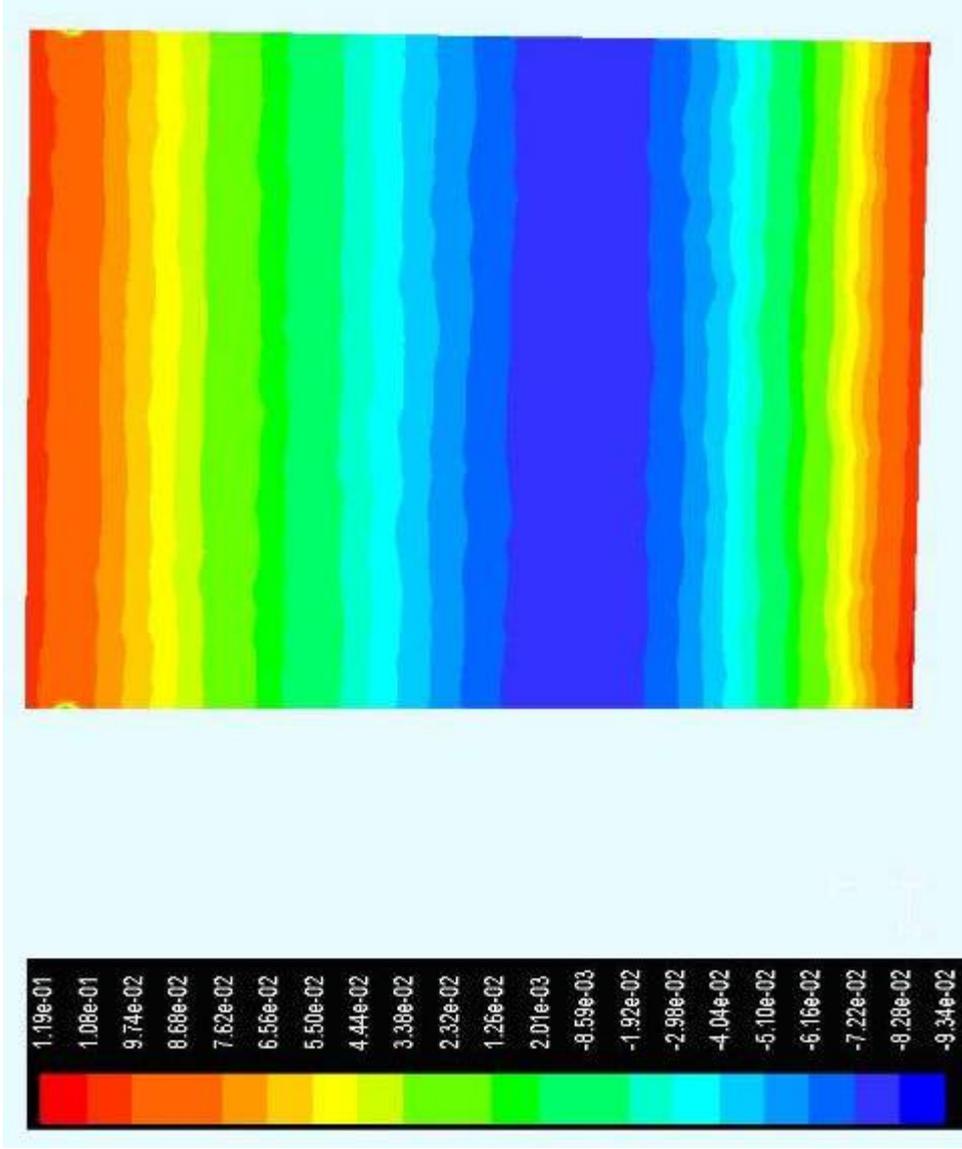
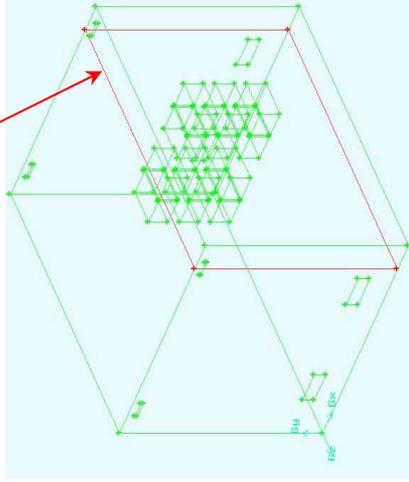
ภาพที่ 47 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 3

แนว ตัด Section Plain 4



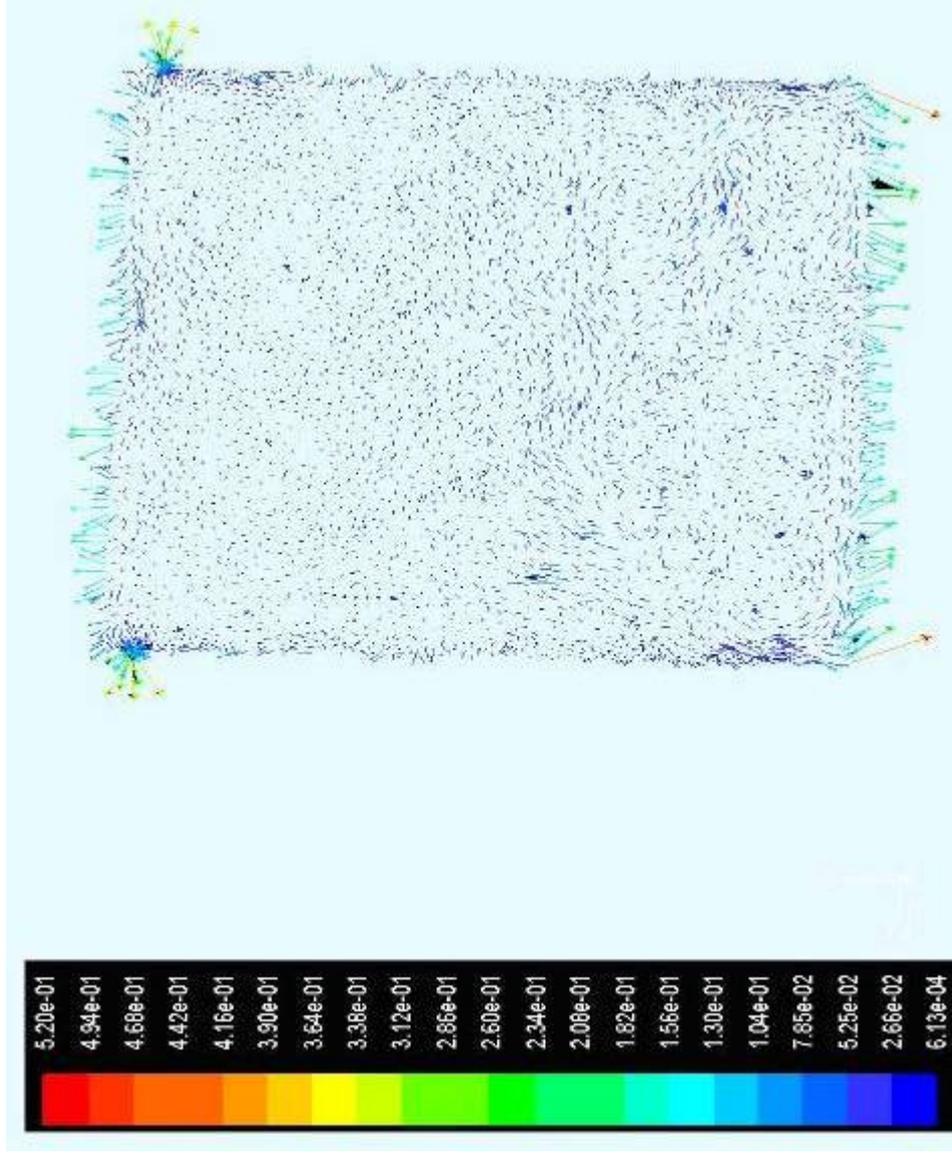
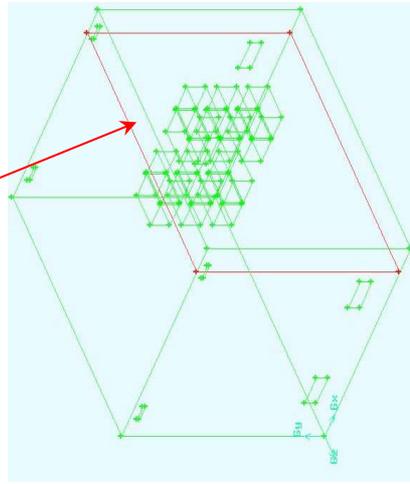
ภาพที่ 48 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 4

แนว ตัด Section Plain 4



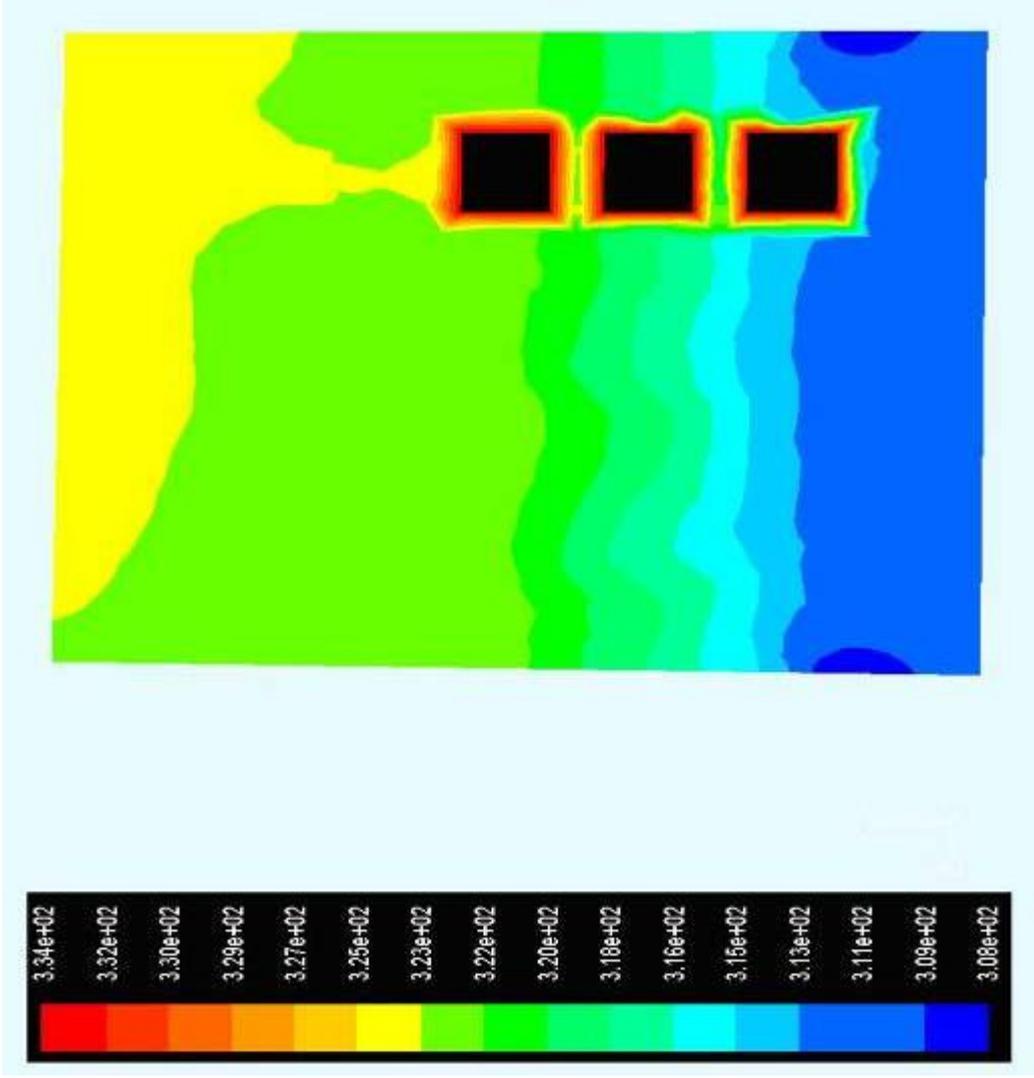
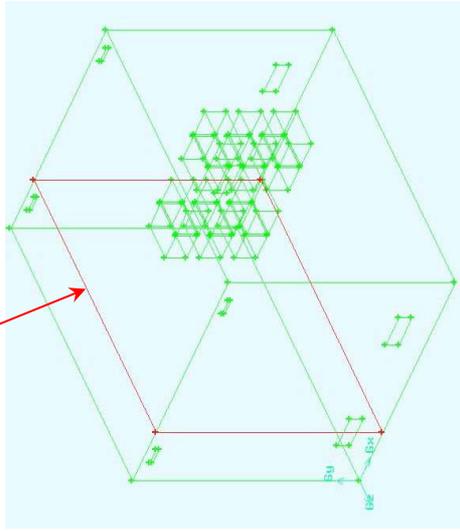
ภาพที่ 49 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 4

แนวตัด Section Plain 4



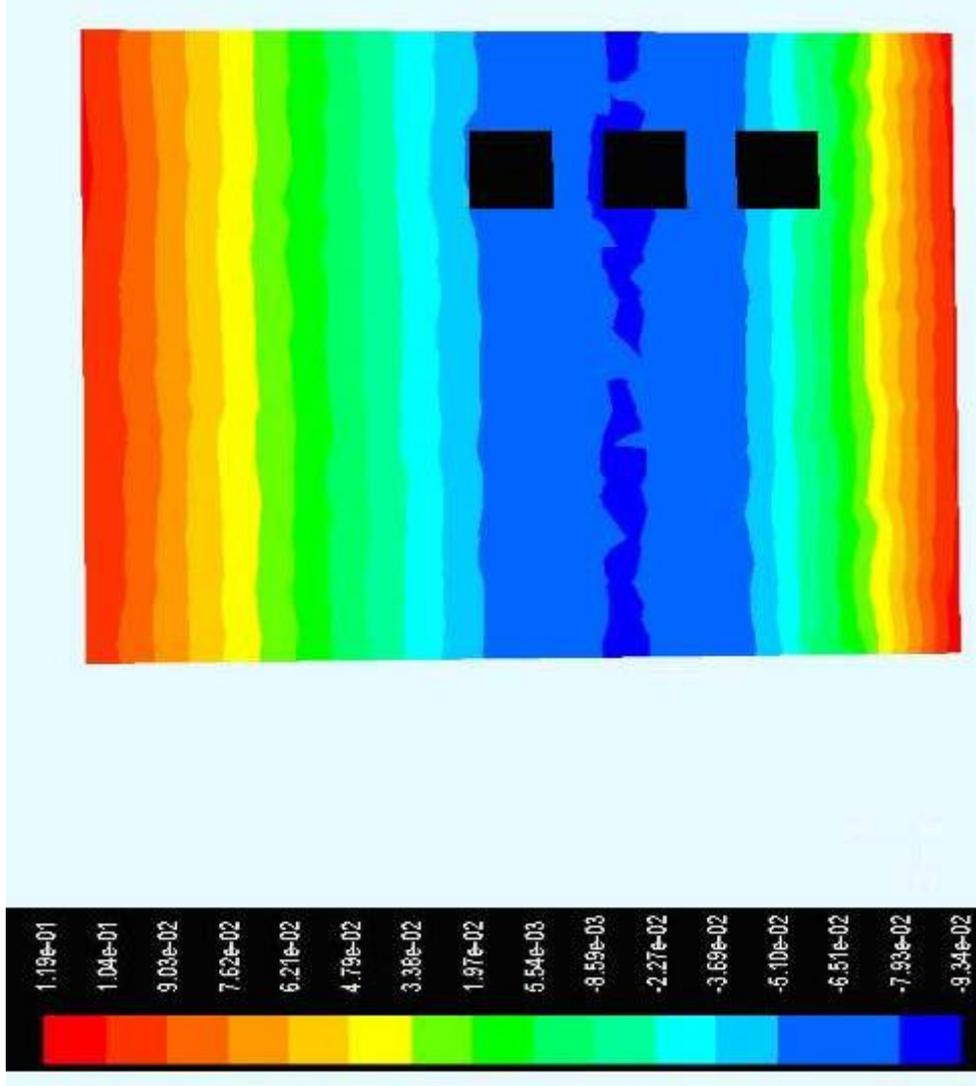
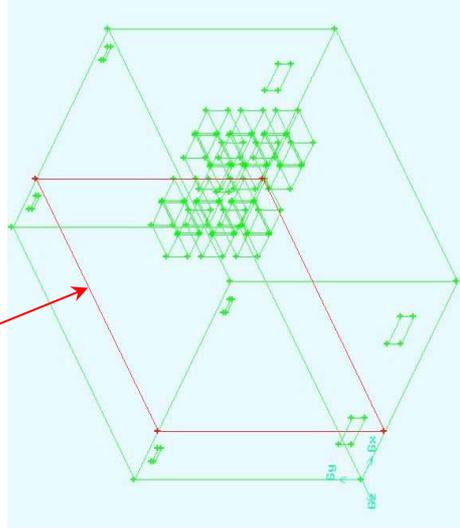
ภาพที่ 50 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 4

แนว ตัด Section Plain 5



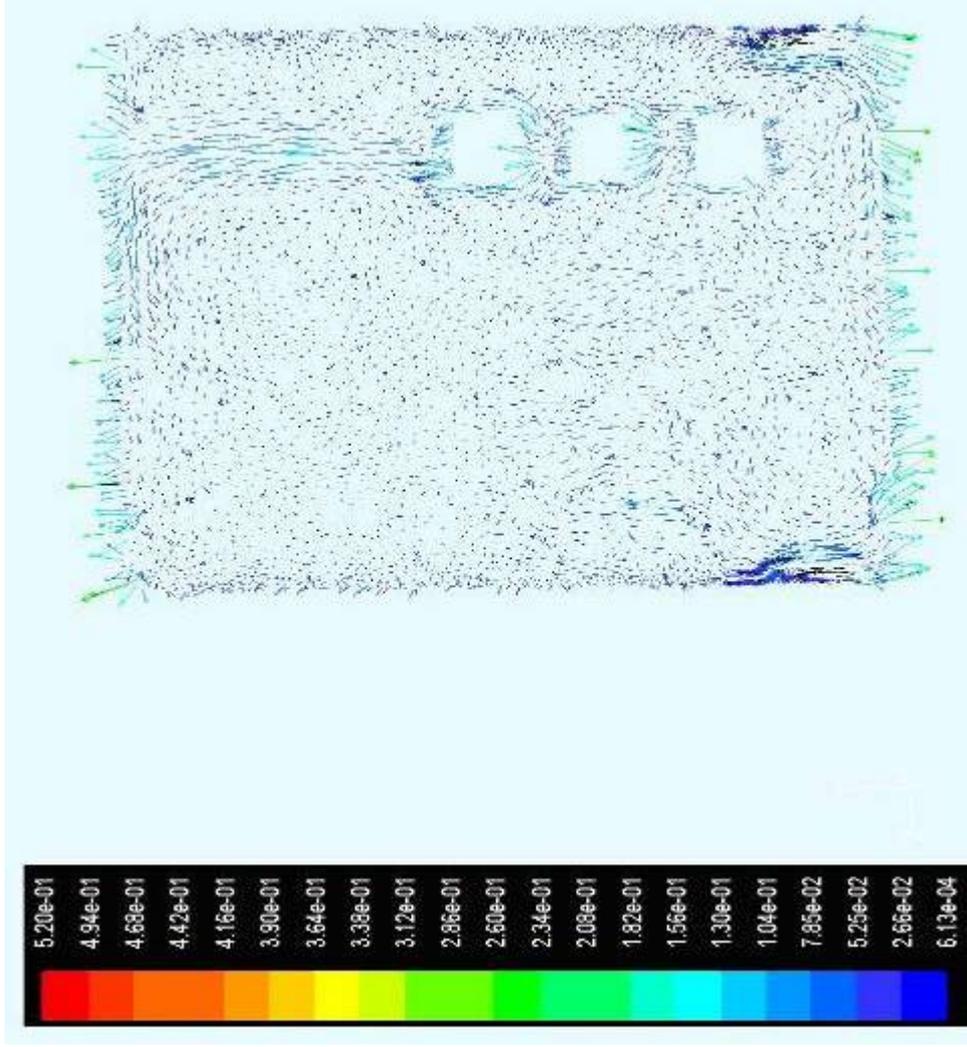
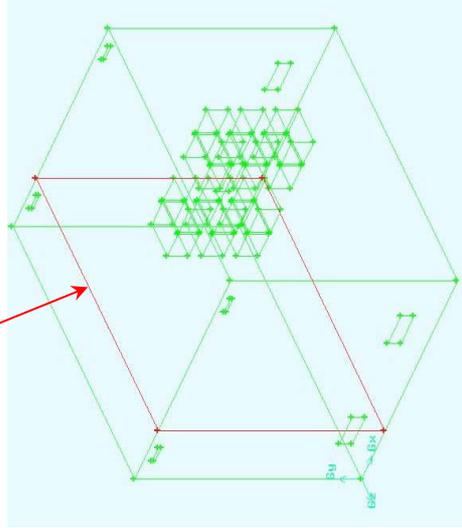
ภาพที่ 51 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 5

แนว ตัด Section Plain 5



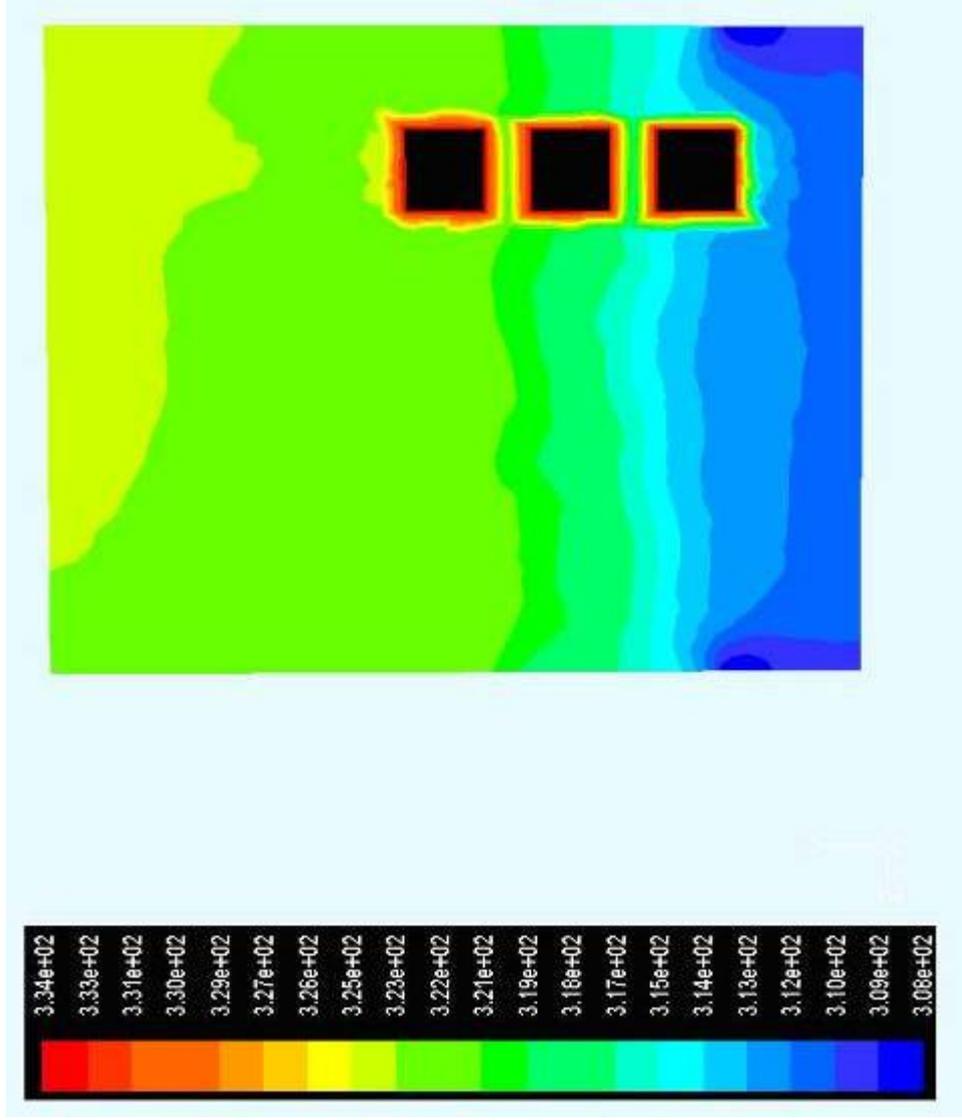
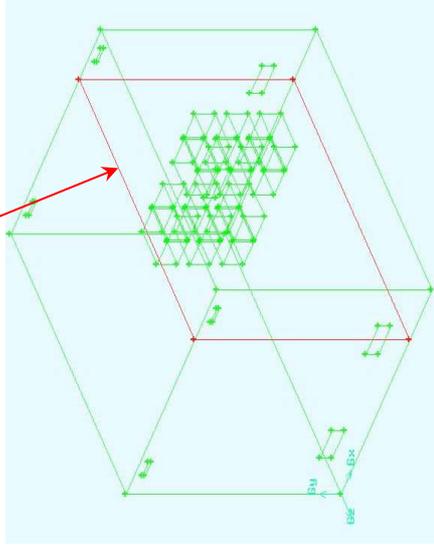
ภาพที่ 52 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 5

แนวตัด Section Plain 5



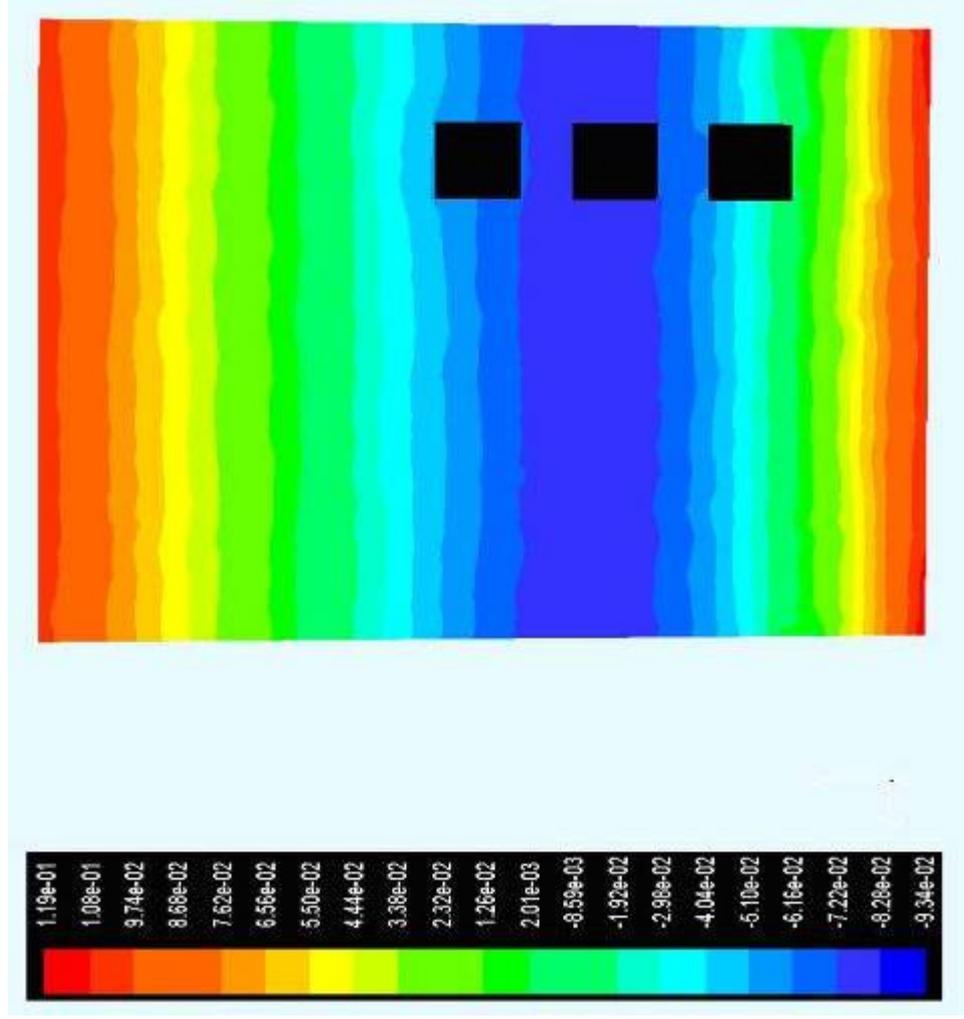
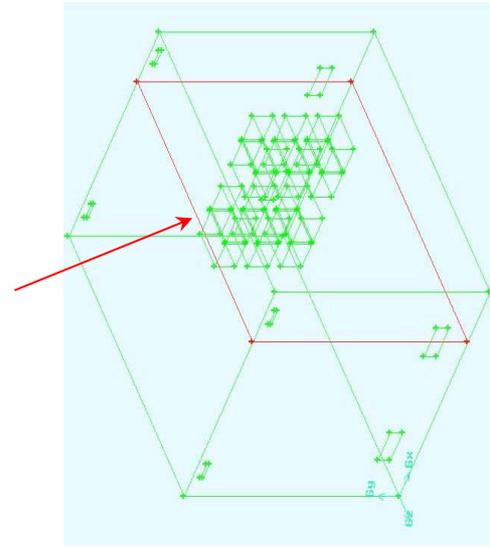
ภาพที่ 53 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 5

แนว ตัด Section Plain 6



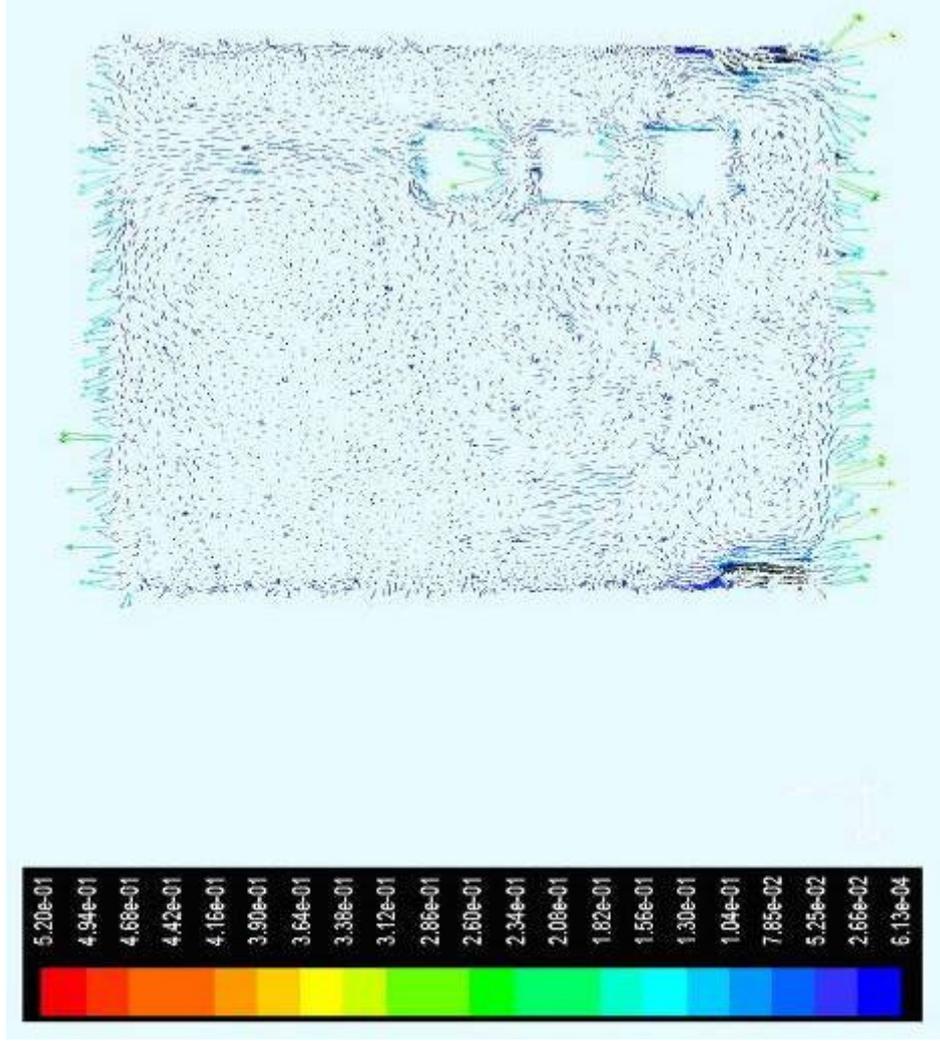
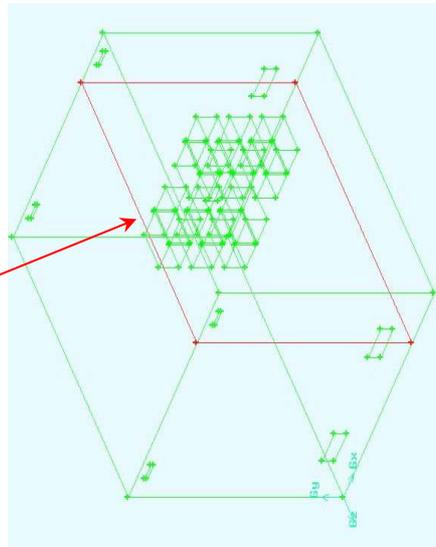
ภาพที่ 54 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในผู้ NGR แนวตัด Section Plain 6

แนว ตัด Section Plain 6



ภาพที่ 55 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในที่ NGR แนวตัด Section Plain 6

แนว ตัด Section Plain 6



ภาพที่ 56 แสดงความเร็วและทิศทางการไหลของอากาศภายในตู้ NGR แนวตัด Section Plain 6

วิจารณ์

ในแบบจำลองตัว NGR ทั้งหมดจะถูกพิจารณาให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 333.9 เคลวิน (หรือ 60.9 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตัว NGR เมื่อมีกระแสเฉลี่ยอันเนื่องมาจากการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) ขนาด 25 แอมป์ไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่อง

ผนังของตู้ถูกกำหนดให้เป็น Wall เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้พิจารณาเฉพาะผลจากการถ่ายเทความร้อนจาก NGR ไปยังอากาศโดยรอบเพียงอย่างเดียว โดยที่อากาศเย็นสามารถไหลเข้าหรือออกจากช่องเปิดทั้ง 8 ช่องที่เปิดสู่ภายนอก ไม่ได้คำนึงถึงการเกิดความร้อนสะท้อนกลับของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ และขนาดตู้ ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำตู้ สีที่ใช้ทำตู้ และไม่ได้คิดผลจากผนังของตู้ที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์อันเนื่องมาจากการที่ตู้ NGR ต้องตั้งอยู่กลางแจ้ง

ผลการจำลอง พบว่าเกิดการสะสมของชั้นความร้อนที่ด้านบนของตู้ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการจำลองในภาพที่ 38 ว่าบริเวณด้านหลังของตู้ที่ตรงกับตำแหน่งของตัว NGR มีอุณหภูมิประมาณ 325 เคลวิน (หรือ 52 องศาเซลเซียส) ซึ่งสูงกว่าบริเวณอื่น

จากผลการจำลองตามภาพที่ 51 และ 54 พบว่าช่องเปิดด้านล่างมีอากาศเย็นไหลเข้าและตามภาพที่ 45 และ 49 พบว่าช่องเปิดด้านบนมีอากาศร้อนไหลออก อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่องเปิดมีขนาดเล็กเกินกว่าที่จะระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปได้หมด จึงเกิดการสะสมของชั้นความร้อน

ผลการจำลองดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า เกิดการเกิดความร้อนสะสมภายในตู้ NGR อันเนื่องมาจากกระแสไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่องจริง

การสะสมของชั้นความร้อนที่บริเวณเหนือตัว NGR ยังเป็นผลให้เกิดการหลอมละลายและลุกไหม้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำที่อยู่เหนือตัว NGR สอดคล้องกับภาพถ่ายสถานที่เกิดเหตุไฟไหม้ที่สถานีไฟฟ้าบ่อวิน 2 และสถานีไฟฟ้านนทบุรี ตามภาพที่ 12 และ 13 ซึ่งย้ำให้เห็นว่า การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำที่ด้านบนตรงกับตัว NGR นั้นส่งผลให้เกิดการหลอมละลาย ทำให้เกิดการลัดวงจรและเกิดประกายไฟขึ้น เป็นผลให้เกิดการลุกไหม้ที่รุนแรงตามมา

จึงอาจกล่าวได้ว่า ตู้ NGR แบบนี้ได้ออกแบบช่องระบายอากาศที่ยังไม่เพียงพอ โดยเฉพาะช่องเปิดของอากาศด้านบนที่ควรจะมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้อากาศร้อนระบายออกเพื่อลดอุณหภูมิสะสมที่บริเวณด้านบนของตู้ แต่เนื่องจากการเปิดช่องว่างเพิ่มจะทำให้สัตว์ต่างๆสามารถหลบเข้าตู้ได้ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นเหตุผลที่ผู้ผลิตทำช่องเปิดด้านบนเล็กเกินไป

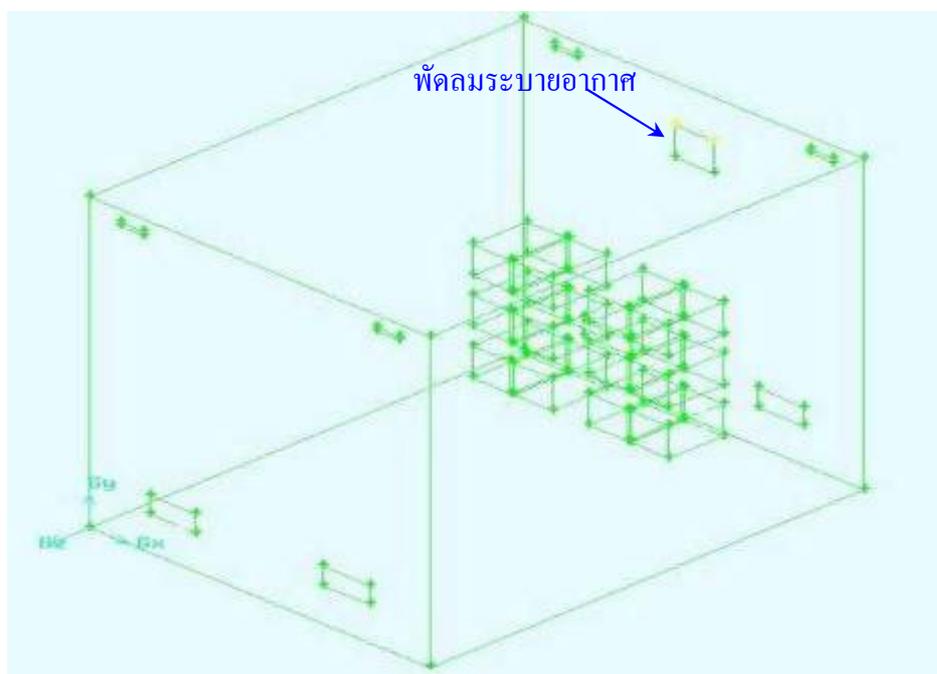
และที่สำคัญผู้ผลิตอาจจะไม่คาดคิดว่าจะเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถตรวจจับได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากไม่มีกระแสไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง ก็จะทำให้มีความร้อนสะสมไม่มากซึ่งก็จะสามารถระบายความร้อนออกได้เพียงพอ แต่การใช้งานจริงนั้นพบว่า จะเกิดการหลอมละลายของอุปกรณ์ประกอบตู้ และบางครั้งตัว NGR ก็เกิดการลุกไหม้ด้วย นั่นหมายถึงมีการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดินอย่างต่อเนื่องนานพอที่จะทำให้เกิดการสะสมของความร้อนในตู้ NGR ดังนั้น เพื่อที่จะเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับตู้ NGR อันอื่นๆต่อไปในอนาคต จึงน่าจะมีการปรับปรุงระบบการระบายอากาศภายในตู้ NGR ในกรณีที่อุณหภูมิภายในตู้สูงจนเกินไป

การปรับปรุงอาจทำได้โดยเพิ่มช่องเปิดให้กว้างขึ้นหรือติดตั้งพัดลมระบายอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้เสนอการติดตั้งพัดลมระบายอากาศที่ทำงานก็ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ค่าหนึ่ง นั่นหมายความว่าถ้าอากาศภายในตู้ไม่สูงเกินค่าที่ตั้งไว้พัดลมระบายอากาศก็จะไม่ทำงาน กล่าวคือถ้าไม่มีการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรลงดิน อากาศภายในตู้ NGR ก็จะไม่ร้อนเกินค่าที่ตั้ง พัดลมก็จะไม่ทำงาน แต่ถ้ามีการลัดวงจรซึ่งส่งผลให้ตัว NGR ร้อนและทำให้อากาศภายในร้อนเกินค่าที่กำหนด พัดลมระบายอากาศก็จะทำงานเพื่อระบายอากาศออกจากตู้ NGR

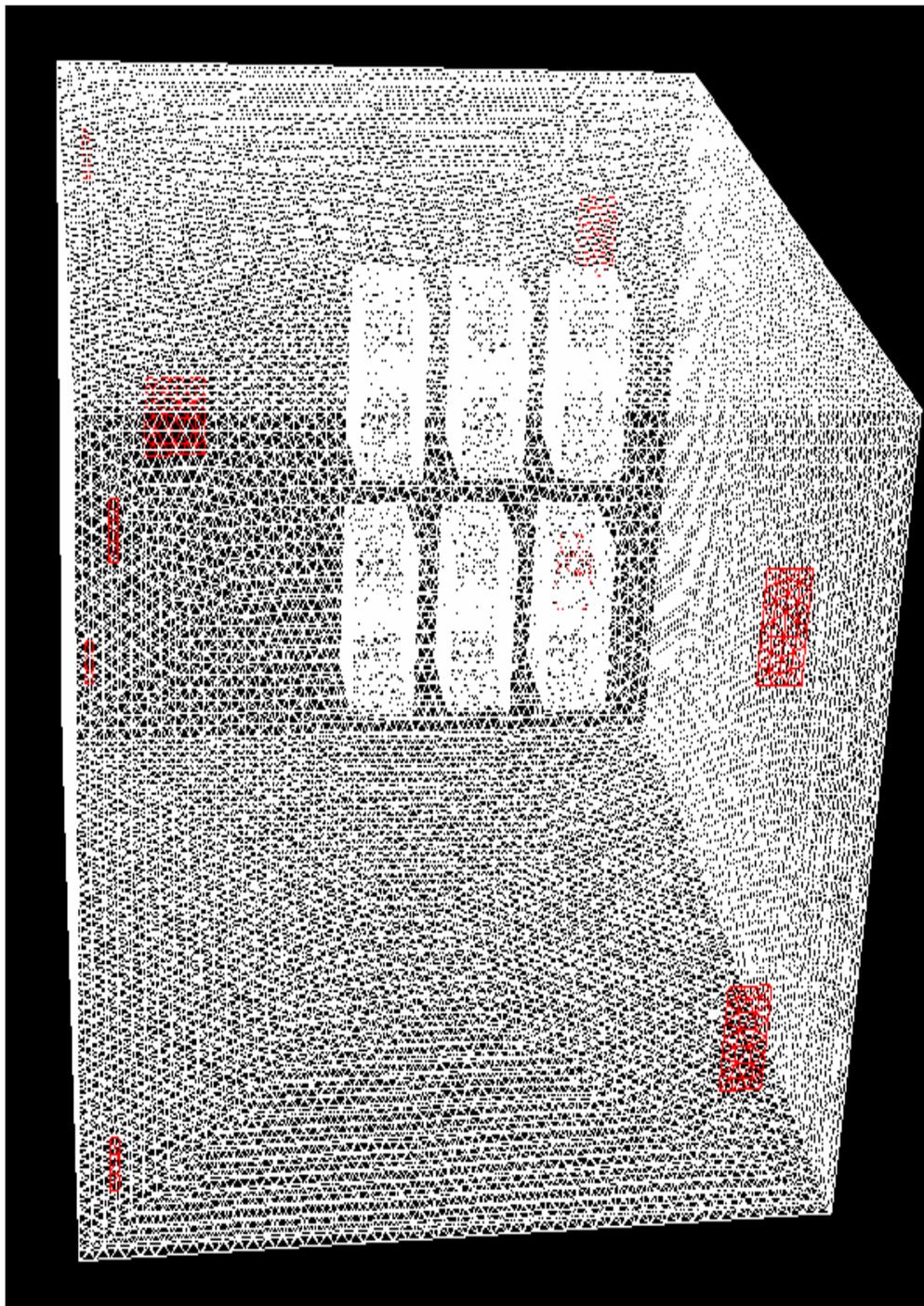
การปรับปรุงระบบระบายอากาศ

ในแบบจำลองที่ปรับปรุงได้เสนอแนวทางติดตั้งพัดลมระบายอากาศ(Exhaust Fan)ขนาด 1060 cfm เพื่อระบายอากาศร้อนออก โดยติดตั้งที่ด้านหลังของตู้ไอส์ต้าแห่ง NGR ดังภาพที่ 57 มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถระบายความร้อนในบริเวณตำแหน่งที่เกิดการสะสมของชั้นความร้อนมากที่สุด ผลการคำนวณจากแบบจำลองหลังจากการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพบว่า ไม่มีการเกิดขึ้นของความดันและอุณหภูมิของอากาศภายในตู้ NGR ดังแสดงในภาพที่ 59-60

นอกจากนั้นการติดตั้งพัดลมระบายอากาศยังสามารถทำให้อุณหภูมิที่ผิวบนของตู้ NGR มีค่าลดลงเหลือประมาณ 300 เคลวิน (หรือ 27 องศาเซลเซียส) จากการตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศภายในเป็น 307.6 เคลวิน (หรือ 34.6 องศาเซลเซียส) ซึ่งส่งผลทำให้ไม่เกิดการหลอมละลายหรือลุกไหม้ของอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR อันเป็นการยืดอายุการใช้งานของตู้ NGR ให้ยาวนานยิ่งขึ้น

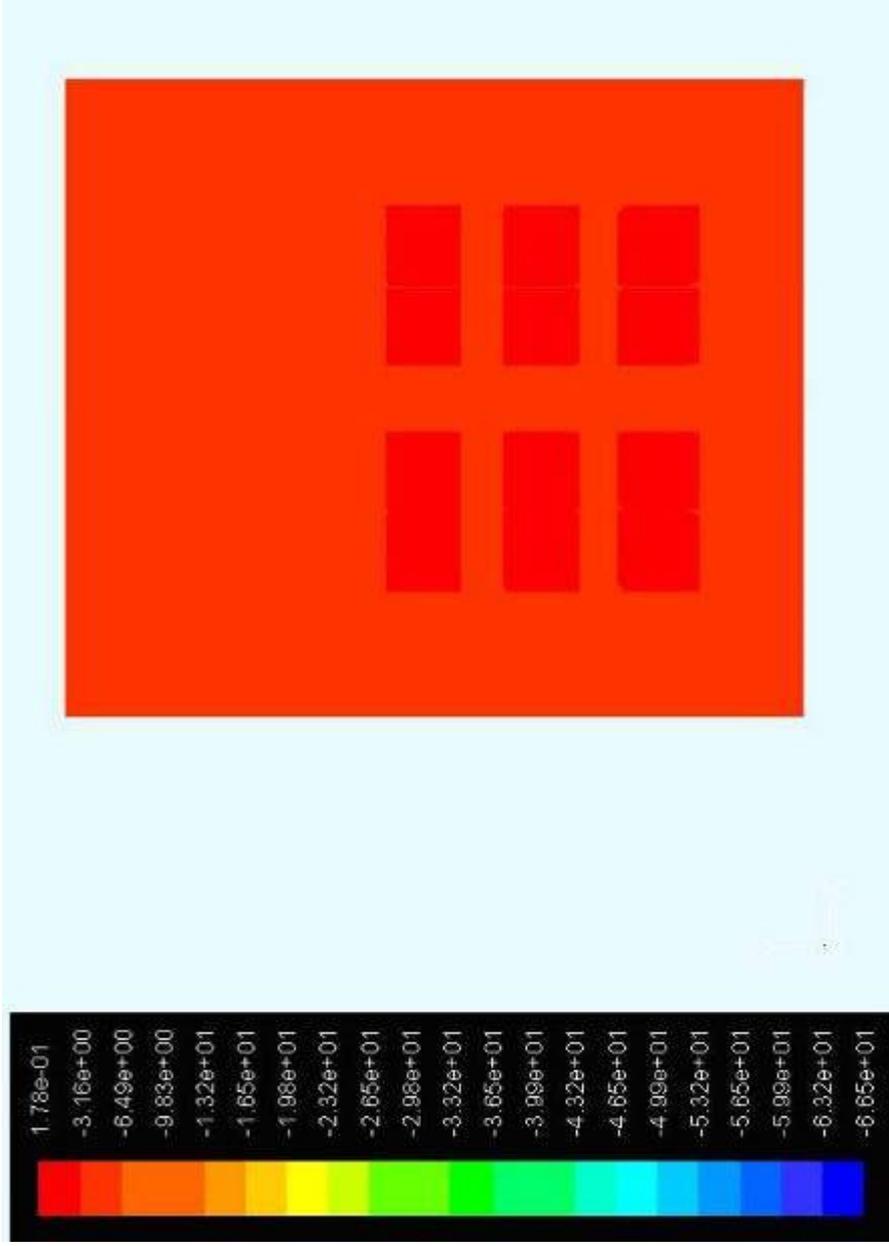
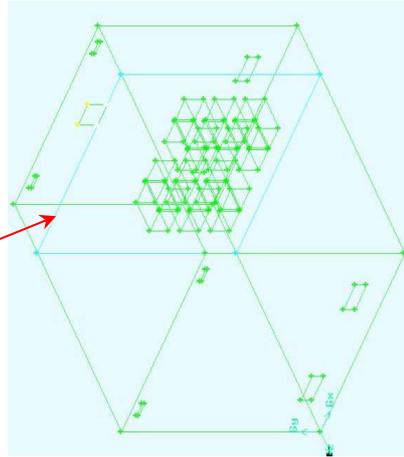


ภาพที่ 57 แบบจำลองของตู้ NGR หลังจากปรับปรุงโดยติดตั้งพัดลมระบายอากาศ



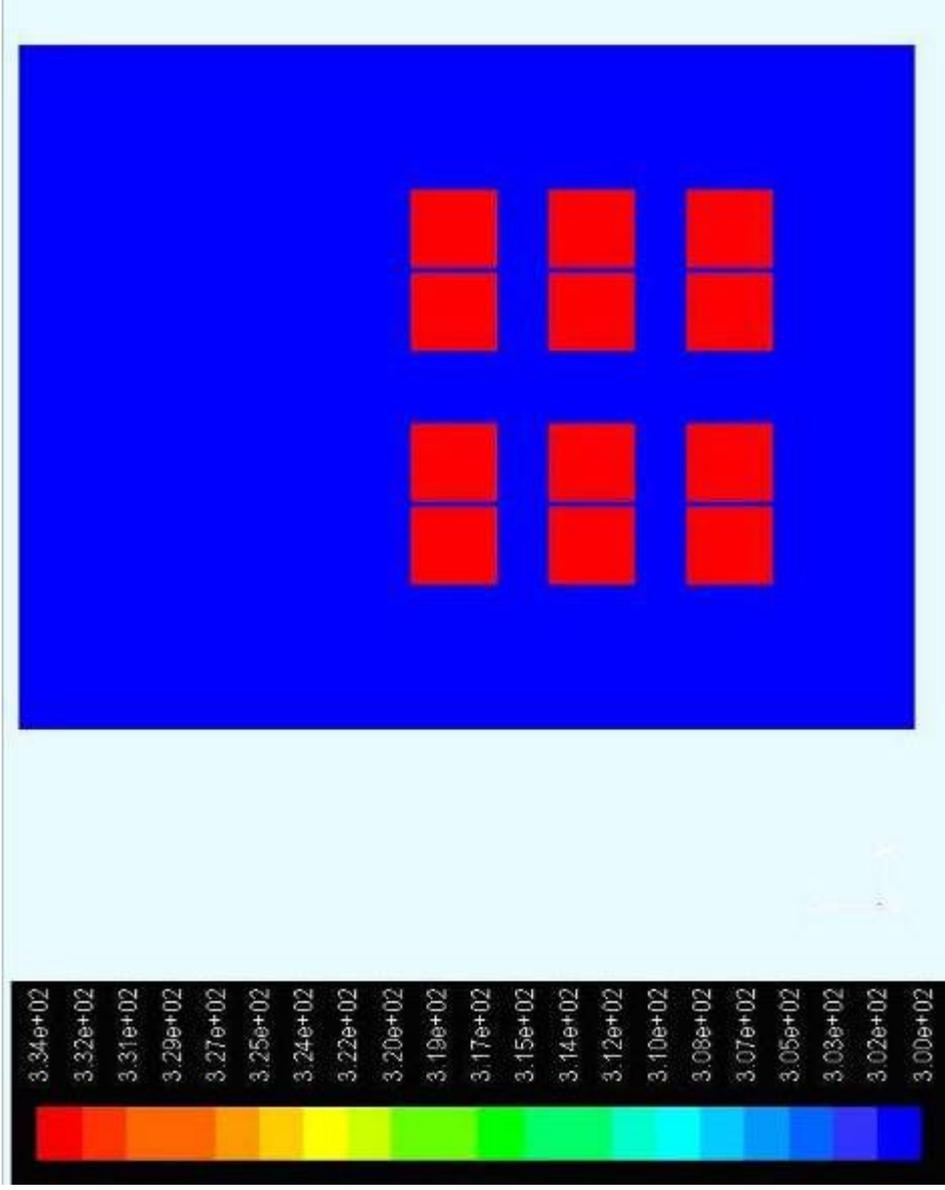
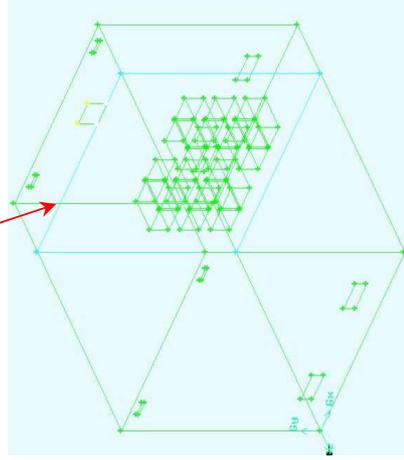
ภาพที่ 58 แสดงกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์(ติดตั้งพัฒนาบะบายอากาศ)

แนว ตัด Section ตำแหน่ง NGR



ภาพที่ 59 แสดงการกระจายตัวของความเค้นภายในตัว NGR แนวตัด Section บริเวณตำแหน่ง NGR (หลังติดตั้ง)

แนว ตัด Section ตำแหน่ง NGR



ภาพที่ 60 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตัว NGR แนวตัด Section บริเวณตำแหน่ง NGR (หลังติดตั้งปลอม)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาถึงการกระจายของอุณหภูมิของอากาศภายในตู้ NGR ซึ่งการศึกษานี้มีสาเหตุมาจากการพบว่า มีการหลอมละลายหรือลู่ไ้ม้ของอุปกรณ์ประกอบภายในตู้ NGR ซึ่งจากการสันนิษฐานคาดว่า การหลอมละลายนี้เกิดจากการระบายความร้อนของอากาศภายในตู้ไม่เพียงพอเมื่อตัว NGR เกิดการลัดวงจรของกระแสลงดินแบบความถี่สูง (High Impedance Fault) เกิดกระแสไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในตู้ จนกระทั่งอุณหภูมิสูงเกินกว่าวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ประกอบตู้ NGR จะทนได้

จากการสร้างแบบจำลองและการศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม Fluent พบว่า มีการสะสมของความร้อนที่ทำให้เกิดชั้นของอุณหภูมิตามข้อสันนิษฐาน อันเนื่องมาจากช่องระบายอากาศด้านบนที่ไม่เพียงพอจริง

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มการระบายความร้อนของอากาศภายในตู้ NGR งานวิจัยนี้จึงเสนอการติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพิ่มเพื่อเพิ่มการระบายอากาศ ซึ่งจากผลการจำลองการติดตั้งพัดลมระบายอากาศให้กับตู้ NGR พบว่าพัดลมระบายอากาศสามารถระบายอากาศได้อย่างเพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิของอากาศภายในตู้ NGR ไม่ให้สูงเกินขีดจำกัดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ประกอบตู้ NGR และจะไม่เกิดการสะสมของความร้อนภายในตู้ NGR

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มการระบายอากาศ อาจทำได้โดยการออกแบบช่องเปิดด้านบนให้ใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถระบายอากาศร้อนที่เกิดขึ้นออกไปได้ ซึ่งอาจทำได้โดยการออกแบบช่องเปิดของตู้ใหม่ โดยเน้นการระบายอากาศในบริเวณที่ใกล้กับจุดกำเนิดความร้อน (Heat source)

นอกจากนี้ ควรมีการปรับปรุงตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำไม่ให้ตรงกับตำแหน่งของตัว NGR ที่เป็นบริเวณที่เกิดความร้อนสูงสุด เพื่อลดโอกาสที่จะทำให้นวนของอุปกรณ์เกิดการเสื่อมสภาพ

การออกแบบระบบระบายอากาศที่ดีในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า นอกจากจะช่วยให้ตู้ไม่เกิดการชำรุดแล้ว ยังเป็นผลให้ตู้สามารถทำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ช่วยยืดอายุการใช้งานของตู้ให้นานยิ่งขึ้น ซึ่งการคำนวณลักษณะสภาวะการไหลของอากาศภายในตู้ สามารถคำนวณโดยอาศัยหลักการของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้วิธีของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการแก้สมการ ซึ่งปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน

โปรแกรม Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) ก็เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ ซึ่งได้รับการพิสูจน์มาแล้วว่าสามารถหาผลเฉลยได้แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ช่วยลดเวลา และค่าใช้จ่ายในการหาผลเฉลยด้วยการทดลองจริง

งานวิจัยนี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นในการศึกษาเกี่ยวกับการระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะจุดประกายให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเกิดความเข้าใจในการใช้งานโปรแกรมประยุกต์ด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) และนำไปสู่การพัฒนาในการออกแบบระบบระบายอากาศภายในตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หรือตู้ อุปกรณ์ไฟฟ้าระบบ 22-24 กิโลโวลต์ เพื่อพัฒนาให้ได้มาตรฐานยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยการกระจายของอุณหภูมิของอากาศภายในตู้ NGR ในครั้งนี้ พบข้อจำกัดบางประการ ดังต่อไปนี้

1. ไม่สามารถทดสอบกระแสไหลผ่านตัว NGR ที่สูงกว่า 25 แอมป์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบ ในข้อเท็จจริงแล้วมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดกระแส High impedance fault ที่มีค่าสูงเกินกว่า 25 แอมป์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรลงดิน ซึ่งหากกระแสลัดวงจรลงดินไหลผ่าน NGR อย่างต่อเนื่องมีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตู้มากขึ้น

แนวทางการวิเคราะห์ห่าอาจทำได้โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความร้อนที่เกิดขึ้นจาก NGR โดยการทดสอบที่ค่ากระแสต่างๆ แล้วหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การหาค่า Initial Conditions ที่เหมาะสมในการตั้งค่าอุณหภูมิของตัว NGR

2. การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนจาก NGR ไปยังอากาศโดยรอบเพียงอย่างเดียว ไม่ได้คิดผลของการเกิดความร้อนสะท้อนกลับของผนังตู้ (Radiation) ซึ่งพบว่ามีความเหมาะสมในระดับหนึ่งสำหรับให้ผลการคำนวณอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลของการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศโดยรอบดังกล่าวสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มขอบเขตในการวิเคราะห์ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มขึ้นในแบบจำลองตัวตู้เป็น 3 ชั้น โดยชั้นแรก ระบุชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำตู้และความหนาของตู้ และชั้นที่สองระบุวัสดุที่ใช้ทำตู้และความหนาของสีที่ใช้ทำตู้ และชั้นที่ 3 เป็นชั้นของอากาศที่เกิดการถ่ายเทระหว่างสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

การเพิ่มการวิเคราะห์ผลจากผนังของตู้ที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) อันเนื่องมาจากการที่ตู้ NGR ตั้งตั้งอยู่กลางแจ้ง ก็สามารถทำได้เช่นกัน แนวทางการหาค่าของผลกระทบของตู้อุปกรณ์ที่ติดตั้งกลางแจ้ง มีกล่าวไว้ใน ANSI/IEEE C37.24-1986 IEEE Guide for Evaluating the Effect of Solar Radiation on Outdoor Metal-Enclosed Switchgear

3. ในการติดตั้งพัดลมระบายอากาศควรพิจารณาในสถานะที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Unsteady) เพื่อวิเคราะห์หาขนาดช่องเปิด/พัดลมที่เหมาะสม ที่สามารถระบายความร้อนที่สะสมออกไปได้อย่างทันที่

การวิเคราะห์สามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของการร้อนขึ้นของ NGR ตามภาพที่ 36 ที่แสดงการร้อนขึ้นของ NGR ขนาด 12.7 โอห์ม เมื่อจ่ายกระแสอย่างต่อเนื่องขนาด 25 แอมป์ โดยนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมากำหนด Initial Condition ในการตั้งค่าอุณหภูมิของตัว NGR

4. ควรมีการทดสอบหาจุดติดไฟ (ignition temperature) ของอุปกรณ์ประกอบและสายไฟแรงต่ำ เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการหลอมละลายและลุกไหม้ ใช้ประกอบเป็นข้อมูลเพื่อกำหนดข้อจำกัดของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ภายในตู้ (minimum temperature allowance)

5. การตั้งค่าเริ่มต้นการทำงานของพัดลมระบายอากาศ อาจทำได้อีกวิธีโดยกำหนดค่ากระแสสูงสุดที่เกิดไหลผ่าน NGR ต่อเนื่องและทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในตู้ ซึ่งหากไม่มีกระแสไหลผ่าน NGR หรือกระแสที่ไหลผ่านไม่เกินค่าที่กำหนด พัดลมก็จะไม่ทำงาน ซึ่งการตรวจจับค่ากระแสไหลผ่าน NGR ผ่านหม้อแปลงกระแส เพื่อใช้ตั้งค่าการทำงานของพัดลมจะช่วยให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นกว่าการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล

6. การปรับย้ายตำแหน่งของอุปกรณ์ เช่น สวิตช์ตัดคอนไบมิด อาจช่วยทำให้การระบายของอากาศดีขึ้น เนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์อาจกีดขวางการไหลของอากาศ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2543. **Material, Equipment and Specifications of Neutral Grounding Resistors for 22 kV 50 Hz Distribution System, Specification NO.R-909/2543.** การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

วารสารรัตน์ จันทสาโร. 2548. เอกสารคำสอนเรื่องวิธีปริมาตรจำกัด สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

ชนวัฒน์ ฉลาดสกุล. 2547. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

Gremmel, H. 1998. **ABB Switchgear Manual, 10th edition.** Central-Druck Trost GmbH&Co., Heusenstamm, the Federal Republic of Germany.

Hoffman Enclosures Inc. 2007. **Thermal management : heat dissipation in electrical enclosures.** Hoffman Enclosures Inc., Available Source: http://www.hoffmanonline.com/stream_document.aspx?rRID=16169&pRID=16168, February 24, 2007.

Anderson, John D. Jr. 1995. **Computational fluid dynamics :the basic with applications.** McGraw-Hill Inc., the United States of America.

Mangs, J. , Paananen, J. , Keski-Rahkonen, O. 2003. Calorimetric fire experiments on electronic cabinets. **Fire Safety Journal** (Vol.38) Issue 2: 165-186.

Keski-Rahkonen, O. , Mangs J. , Turtola, A. 1993. **Ignition of and fire spread on cables and electronics components.** Available Source: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P387.pdf>, February 24, 2007.

Labos, W. , Mannarino, A. , Drobnjak, G. , Ihara, S. , Skliutas, J. 2005. A possible mechanism for neutral grounding resistor failures. **Power Engineering Society General Meeting, Jun 12-16, 2005.** IEEE: 1149-1154.

Me'lis, S. , Rigollet, L. , Such, J.M. , Casselman, C. 2004. Modelling of Electrical Cabinet Fires Based On The CARMELA Experimental Program. **Eurosafe Forum Berlin Nov 8-9, 2004.** Towards convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe, Berlin. Available Source: http://www.eurosafe-forum.org/files/pe_92_24_1_2_09_electrical_cabinet_fire_melis_271004.pdf, February 24, 2007.

Gillman, T.H. and Le May, I. 2007. Mechanical and electrical failures leading to major fires. **Engineering Failure Analysis 2007(Vol.14): 995-1018.**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
Single Line Diagram

ภาคผนวก ข

ข้อมูลด้านเทคนิคของ NGR จากผู้ผลิต (Technical Data of NGR)

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลด้านเทคนิคของ NGR จากผู้ผลิต (Technical Data of NGR)

Nominal Resistance at 20°C	12.7 ohm
Resistance Material	NiCr3020 , mat.ref.1.4860
Resistance Temperature Coefficient	< 0.00031 /K
Manufacturing Tolerance	± 10%
Rated Short Circuit Time Current	1000 A ,10s
Rated Continuous Current Max.	10A
Rated Energy Consumption	127 MJ
Temperature Rise When Carrying Short Circuit Current	Max.760 °C
Min. Cooling Down Time after Energy Consumption	2 hr
Ambient Temperature max.	50°C
Protection Class for Mounting into Steel Cubicle	IP00
Supporting Frame made from	CrNi 1810
Terminal made from	Nickel plated copper

ภาคผนวก ค

แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขที่ใช้งาน (Numerical Scheme)

แบบวิธีผลต่างอันดับสอง (2nd-order Upwind Differencing Scheme)

แบบแผนวิธีผลต่างอันดับสอง ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำในการคำนวณให้สูงขึ้น โดยอาศัยอนุกรมขยายของเทเลอร์ (Taylor Series Expansion) จากตัวแปรที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ของปริมาตรควบคุม แล้วทำการประมาณค่าต่างๆที่ต้องการที่ผิวเซลล์แต่ละด้านด้วยสมการ

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \Delta \vec{S}$$

โดยที่ ϕ และ $\nabla \phi$ คือค่าตัวแปรที่จุดศูนย์กลางเซลล์และค่า Gradient ที่ศูนย์กลางของเซลล์ ส่วน $\Delta \vec{S}$ คือ เวกเตอร์ระยะขจัดจุดศูนย์กลางไปยังผิวเซลล์ ค่า $\nabla \phi$ ที่แต่ละเซลล์หาได้จาก ทฤษฎี Divergence Theorem ดังสมการ

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \tilde{\phi}_f \vec{A}$$

$\tilde{\phi}_f$ หาได้จากการเฉลี่ยค่าของตัวแปร ϕ ระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกัน

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาขนาดพัดลมระบายอากาศ

การคำนวณหาขนาดพัดลมระบายอากาศ

จาก Substation design calculation criteria by ATT&EDF ,chapter 12 :ventilation system

$$Ventilation_rate = \frac{k \cdot Total_heat_loss}{\Delta T} \quad (7)$$

กำหนดให้ $k = 2,774 \frac{m^3 K}{kWhr}$

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศที่นำเข้ากับอุณหภูมิอากาศที่ระบายออก ในที่นี้กำหนดให้

อากาศที่นำเข้าเป็นอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมโดยรอบ $= 38^{\circ}C = 311 K$

อากาศที่ระบายออกเป็นอุณหภูมิต่ำสุดภายในตู้ที่ขอมรับได้ $= 50^{\circ}C = 323 K$

ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตู้ (Total Heat Loss) $= I^2 R$

$$= (25)^2 (12.7)$$

$$= 7.9375 kW$$

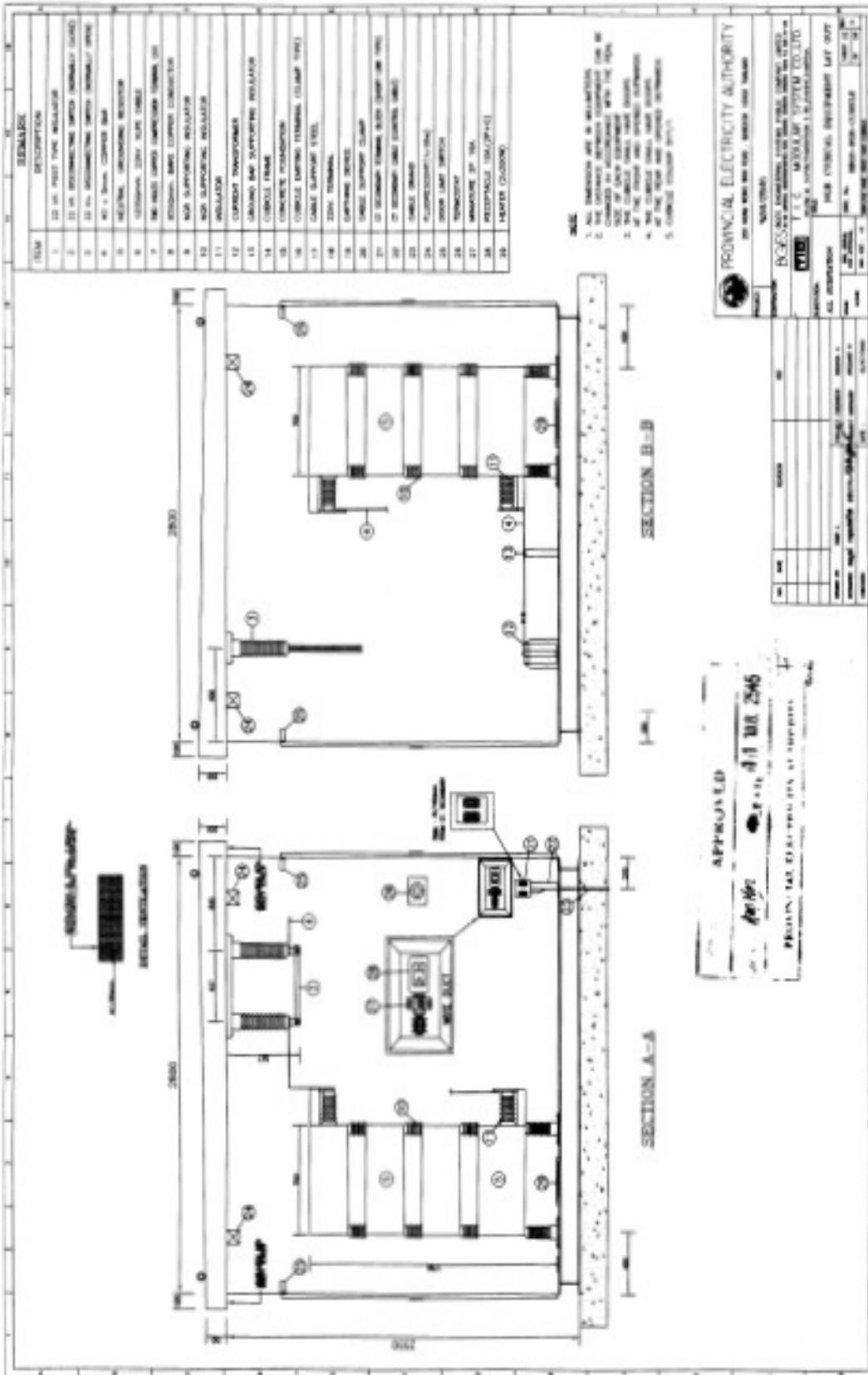
จะได้ $Ventilation_rate = \frac{2774 \times 7.9375}{(323 - 311)}$

$$= 1,834.885 \text{ CMH}$$

$$= 1,079.972 \text{ cfm}$$

เลือกขนาดพัดลมที่มีตามท้องตลาด คือ ขนาด 1,060 cfm

ภาคผนวก จ
DRAWING OF NGR



ITEM	REMARKS
1	22 1/2 FEET TYPE RELAY
2	22 1/2 FEET TYPE RELAY
3	22 1/2 FEET TYPE RELAY
4	22 1/2 FEET TYPE RELAY
5	22 1/2 FEET TYPE RELAY
6	22 1/2 FEET TYPE RELAY
7	22 1/2 FEET TYPE RELAY
8	22 1/2 FEET TYPE RELAY
9	22 1/2 FEET TYPE RELAY
10	22 1/2 FEET TYPE RELAY
11	22 1/2 FEET TYPE RELAY
12	22 1/2 FEET TYPE RELAY
13	22 1/2 FEET TYPE RELAY
14	22 1/2 FEET TYPE RELAY
15	22 1/2 FEET TYPE RELAY
16	22 1/2 FEET TYPE RELAY
17	22 1/2 FEET TYPE RELAY
18	22 1/2 FEET TYPE RELAY
19	22 1/2 FEET TYPE RELAY
20	22 1/2 FEET TYPE RELAY
21	22 1/2 FEET TYPE RELAY
22	22 1/2 FEET TYPE RELAY
23	22 1/2 FEET TYPE RELAY
24	22 1/2 FEET TYPE RELAY
25	22 1/2 FEET TYPE RELAY
26	22 1/2 FEET TYPE RELAY
27	22 1/2 FEET TYPE RELAY
28	22 1/2 FEET TYPE RELAY
29	22 1/2 FEET TYPE RELAY

- NOTE
1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 2. THE OFFICIAL APPROVAL COMPANY CAN BE CHANGED AS ACCORDANCE WITH THE PLAN
 3. THE CABLE SHALL BE AS SHOWN
 4. THE CABLE SHALL BE AS SHOWN
 5. CABLE SHALL BE AS SHOWN

APPROVED

[Signature]

PROVIN. TEL. ELECTRICAL ENGINEERS

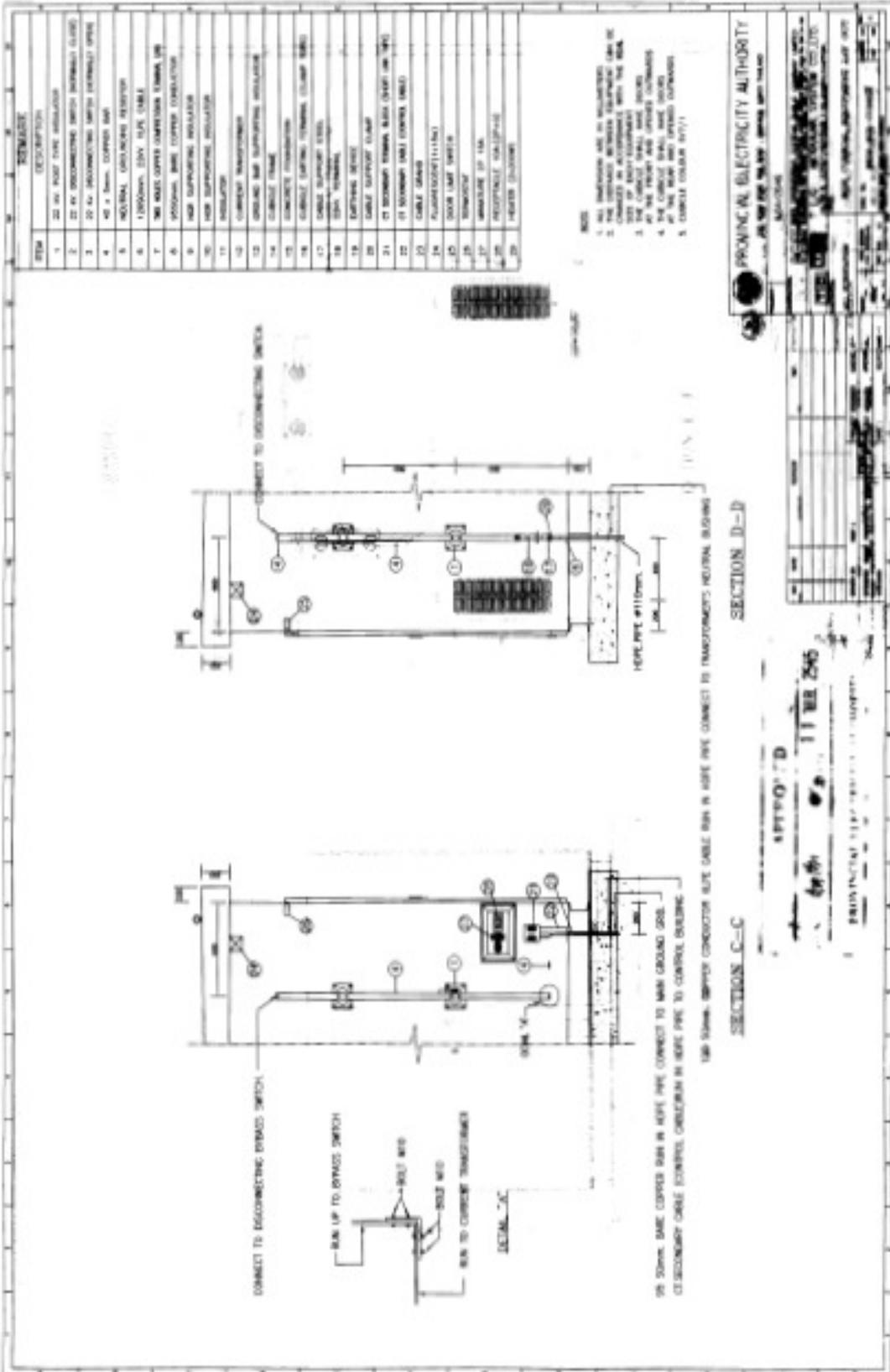
NO. 2546

PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY

NO. 2546

PROVIN. TEL. ELECTRICAL ENGINEERS

NO. 2546



ITEM	DESCRIPTION
1	22 IN. HOOD TYPE INSULATOR
2	22 IN. DISCONNECTING DEVICE (MATERIALS CLASSED)
3	22 IN. DISCONNECTING DEVICE (MATERIALS CLASSED)
4	4 IN. COPPER BAR
5	INSULATED GROUNDING RESISTOR
6	1/2 IN. COPPER BAR
7	1/2 IN. COPPER BAR
8	1/2 IN. COPPER BAR
9	1/2 IN. COPPER BAR
10	1/2 IN. COPPER BAR
11	1/2 IN. COPPER BAR
12	1/2 IN. COPPER BAR
13	1/2 IN. COPPER BAR
14	1/2 IN. COPPER BAR
15	1/2 IN. COPPER BAR
16	1/2 IN. COPPER BAR
17	1/2 IN. COPPER BAR
18	1/2 IN. COPPER BAR
19	1/2 IN. COPPER BAR
20	1/2 IN. COPPER BAR
21	1/2 IN. COPPER BAR
22	1/2 IN. COPPER BAR
23	1/2 IN. COPPER BAR
24	1/2 IN. COPPER BAR
25	1/2 IN. COPPER BAR
26	1/2 IN. COPPER BAR
27	1/2 IN. COPPER BAR
28	1/2 IN. COPPER BAR
29	1/2 IN. COPPER BAR

- NOTES
1. ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.
 2. CHANGES IN CONNECTIONS WITH THE BSA.
 3. SEE ANY COMMENTS.
 4. THE CABLE SHALL HAVE INSULATION.
 5. THE CABLE SHALL HAVE GROUNDING AT THE END AND SPREAD OUTWARDS.
 6. CABLE COLOR (BY 7/1)

SECTION C-C

SECTION D-D

PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY

11 FEB 2005

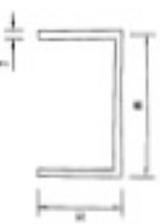
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY



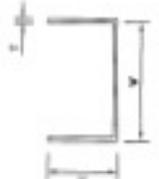
DETAIL "1"



DETAIL "2"



DETAIL "3"



DETAIL "4"



DETAIL "5"



DETAIL "6"

REMARKS - STRUCTURE

1. FRAME L CHANNEL 50x50x2mm.(WxHxT) THICKNESS.
2. FRAME SUPPORT INSULATOR 100x50x20x2.0mm.(WxHxDxT) THICKNESS.
3. BASE FRAME SUPPORT NGR. 100x50x5.0mm.(WxHxT) THICKNESS.
4. BASE FRAME C CHANNEL 50x50x3.0mm.(WxHxT) THICKNESS.
5. BASE FRAME U CHANNEL 150x75x5.0mm.(WxHxT) THICKNESS.

- DOOR USE STEEL PLATE 2.0mm.THICKNESS
- SIDE AND ROOF USE STEEL PLATE 2.0mm.THICKNESS
- PARTITION USE STEEL PLATE 2.0mm.THICKNESS

Approved: **11 MB 2845**

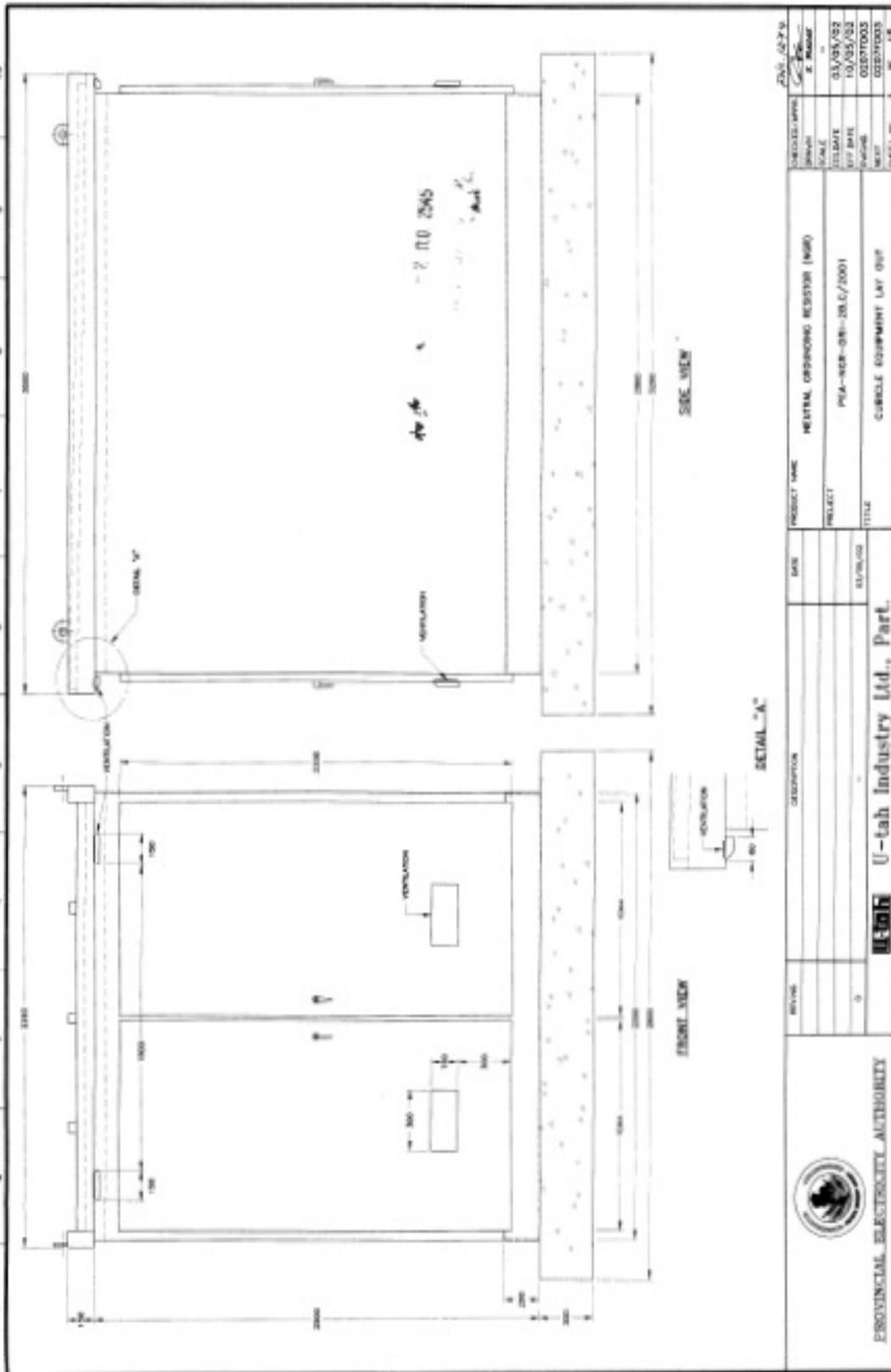
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY

P.E.A. FORM NO. 001 (REVISED) 2008

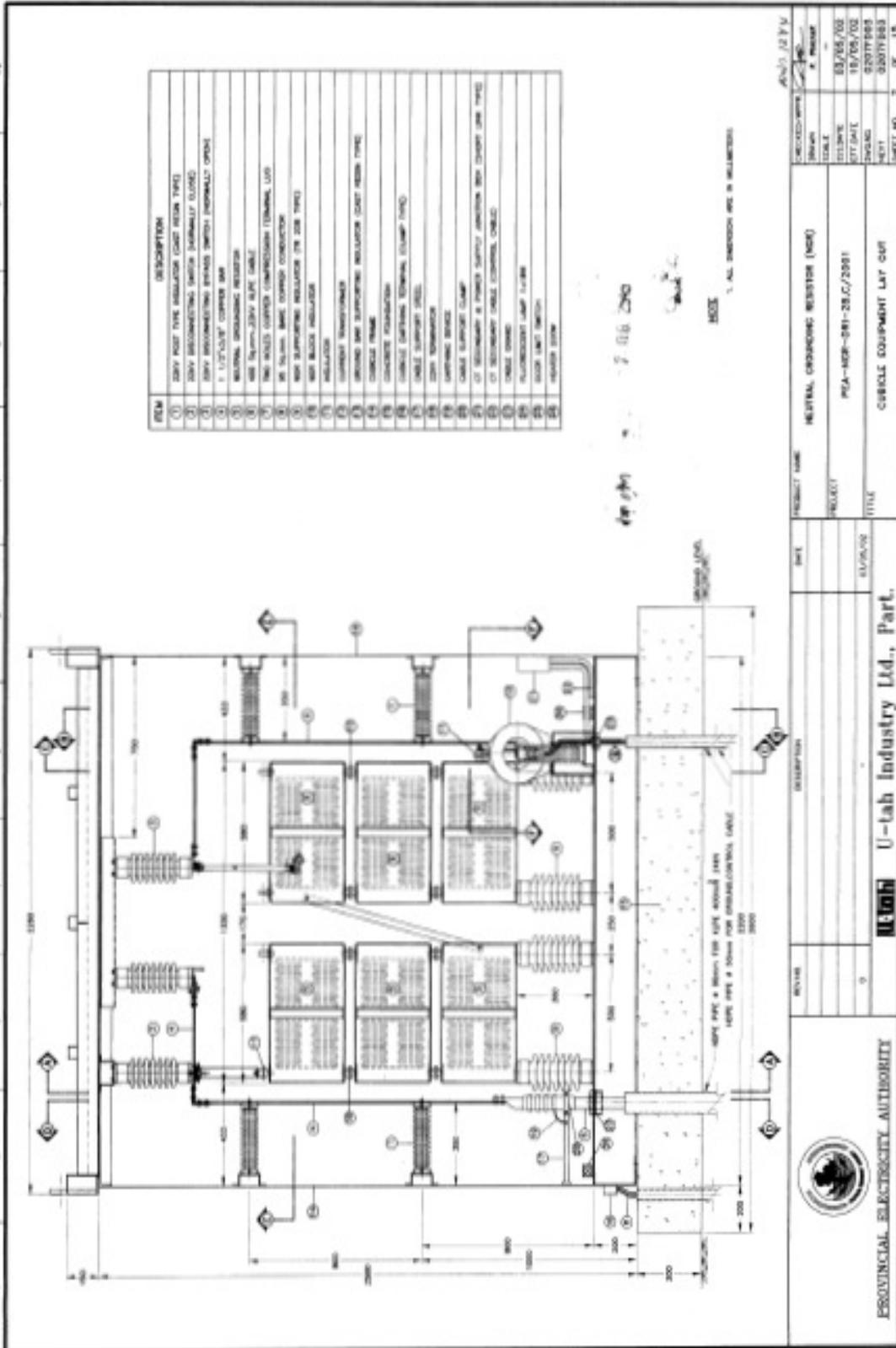
PROJECT	NO. OF SHEETS	SHEET NO.	DATE

DESIGNED BY	CHECKED BY	DATE

P.E.A. FORM NO. 001 (REVISED) 2008
 P.E.A. FORM NO. 001 (REVISED) 2008
 P.E.A. FORM NO. 001 (REVISED) 2008



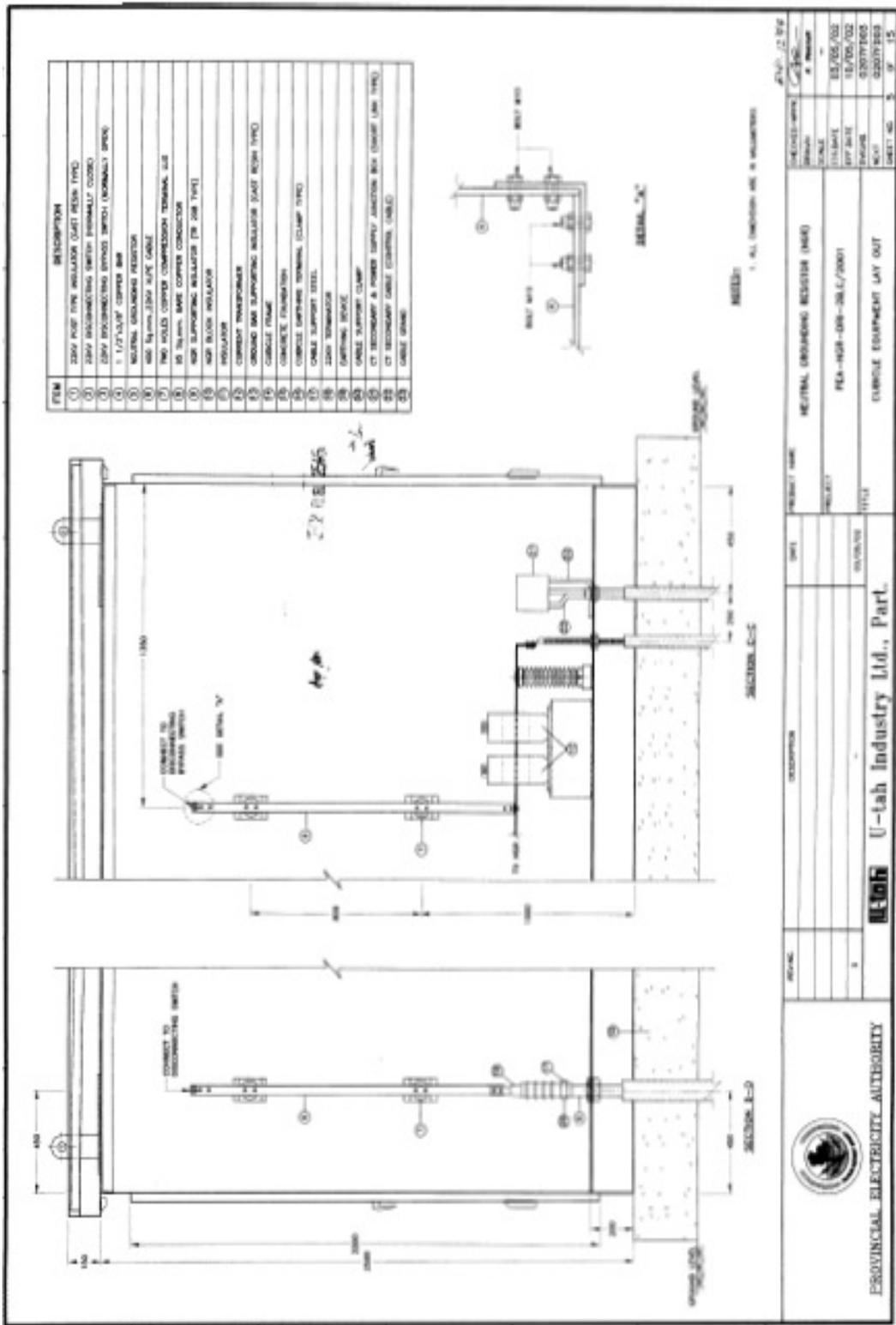
 ESSENTIAL ELECTRICITY AUTHORITY	U-TAH U-tah Industry Ltd., Part.	REVISED	DESCRIPTION	DATE	PROJECT NAME	WESTERN GENERATOR RESISTOR (WGR)	DESIGNED BY	W. W. WILSON
		0			PROJECT	PGA-WGR-081-28.C/2001	DRAWN BY	W. W. WILSON
					TITLE	CABLE EQUIPMENT LAY OUT	CHECKED BY	W. W. WILSON
							DATE	10/05/03
							SCALE	AS SHOWN



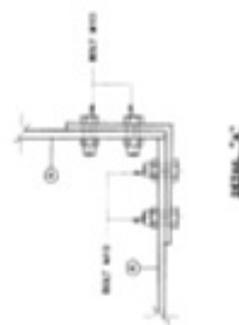
ITEM	DESCRIPTION
01	DRY POLE TYPE RELAY (CANT REAR TYPE)
02	DRY DISCONNECTING SWITCH (HARMONICLY CLOSED)
03	DRY DISCONNECTING SWITCH (NORMAL OPEN)
04	1.5/2.5KV CURRENT BAR
05	INTERNAL MECHANICAL RESISTOR
06	400 SUPPLY-LEVEL ALFT CABLE
07	100 SOLID CORED (COMPRESSION TERMINAL LUG)
08	10 ALUM. BARE COPPER CONDUCTOR
09	100 SUPPLYING RELAY (20 200 TYPE)
10	100 SUPPLY RELAY
11	RELAY
12	CURRENT TRANSFORMER
13	100V 500 SUPPLYING RELAY (CANT REAR TYPE)
14	CIRCUIT BREAKER
15	CONCRETE FOUNDATION
16	CABLE (CANTING TERMINAL CLAMP TEND)
17	CABLE SUPPORT STEEL
18	200V TERMINATOR
19	WIRING BOARD
20	CABLE SUPPORT CLAMP
21	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
22	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
23	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
24	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
25	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
26	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
27	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
28	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
29	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
30	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
31	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
32	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
33	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
34	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
35	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
36	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
37	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
38	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
39	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
40	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
41	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
42	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
43	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
44	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
45	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
46	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
47	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
48	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
49	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
50	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
51	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
52	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
53	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
54	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
55	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
56	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
57	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
58	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
59	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
60	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
61	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
62	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
63	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
64	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
65	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
66	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
67	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
68	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
69	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
70	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
71	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
72	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
73	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
74	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
75	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
76	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
77	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
78	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
79	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
80	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
81	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
82	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
83	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
84	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
85	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
86	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
87	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
88	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
89	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
90	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
91	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
92	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
93	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
94	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
95	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
96	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
97	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
98	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
99	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)
100	100 SUPPLYING & PHASE SUPPLY JUNCTION BOX (CANT REAR TYPE)

SCALE 1:1 ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

REVISION	DATE	DESCRIPTION
0		
U-tah Industry Ltd., Part.		
PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY		
PROJECT NAME	HEAVY DRAGGING RESISTOR (NDE)	
PROJECT	PCA-MCB-081-25.C./2001	
DATE	18/05/03	
BY	S2077583	
CHECKED	S2077583	
APPROVED	S2077583	
SHEET NO.	2	OF 15



ITEM	DESCRIPTION
1	250V FUSE TYPE INSULATOR (CAST RESIN TYPE)
2	250V DISCONNECTING SWITCH (NORMALLY CLOSED)
3	250V DISCONNECTING SWITCH (NORMALLY OPEN)
4	1/2" DIA. COPPER BAR
5	INTERNAL GROUNDING RESISTOR
6	1/2" DIA. 250V RAYE CABLE
7	250V HOLES COPPER COMPRESSION TERMINAL ASSEMBLY
8	25 1/2" DIA. RAYE COPPER CONDUCTOR
9	1/2" DIA. COPPER BAR
10	1/2" DIA. COPPER BAR
11	INSULATOR
12	CURRENT TRANSFORMER
13	GROUND BAR SUPPORTING INSULATOR (CAST RESIN TYPE)
14	CABLE FRAME
15	CONCRETE FOUNDATION
16	CABLE SUPPORTING TERMINAL CLAMP TYPE
17	CABLE SUPPORT STEEL
18	CLAMP TERMINATOR
19	CABLE SUPPORT CLAMP
20	CLAMP SUPPORT & POWER SUPPLY JUNCTION BOX (CAST RESIN TYPE)
21	CLAMP SUPPORT & POWER SUPPLY JUNCTION BOX (CAST RESIN TYPE)
22	CLAMP SUPPORT & POWER SUPPLY JUNCTION BOX (CAST RESIN TYPE)
23	CABLE FRAME



	PROJECT NAME NEUTRAL GROUNDING RESISTOR (NGR)	SHEET NO. 18/205/02
	SHEET NO. 18/205/02	SHEET NO. 18/205/02
PROJECT NO. PEA-1928-009-08-L/2001	SHEET NO. 18/205/02	SHEET NO. 18/205/02
PROJECT NO. U-tah Industry Ltd., Part	SHEET NO. CURBULE EQUIPMENT LAY OUT	SHEET NO. 18/205/02

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวชนาลัย จรุงญเพ็ญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	24 กุมภาพันธ์ 2518
สถานที่เกิด	อำเภอท่าคันโท จังหวัดกาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	วศบ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยหัวหน้าแผนก
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองออกแบบสถานีไฟฟ้า ฝ่ายออกแบบสถานีและสายส่ง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-