การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-towerด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Heat Transfer Analysis in Mid-tower Computer Case by Finite Element Method

นายธนวัฒน์ กลมไล รหัส 59362062

นางสาวมนัสวี พันธ์งอก รหัส 59364271

นายวสุนรัตน์ สุยะ รหัส 59364981

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2562

แบบเสนอปริญญานิพนธ์

หัวข้อโครงงาน : การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายธนวัฒน์ กลมไล รหัส 59362062

นางสาวมนัสวี พันธ์งอก รหัส 59364271

นายวสุนรัตน์ สุยะ รหัส 59364981

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2562

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผศ.นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ

(รศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....กรรมการ

(รศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล)

หัวข้อโครงงาน : การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายธนวัฒน์ กลมไล รหัส 59362062

นางสาวมนัสวี พันธ์งอก รหัส 59364271

นายวสุนรัตน์ สุยะ รหัส 59364981

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2562

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลมที่ส่งผลต่อการระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ทำโดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองด้วยการวัดค่าอุณหภูมิกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation ที่ภาระการทำงานของ CPU อยู่ที่ 40% ผลจากการเปรียบเทียบ พบว่าค่า Root Mean Square Error และ Mean Bias Difference ของ CPU มีค่าเท่ากับ 0.76 และ 0.70 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum ที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงถือได้ว่าความถูกต้องแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ ทำการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลม โดยกำหนดให้ปริมาณการไหลของอากาศเท่ากับ 28 CFM และอุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 25 $^{\circ}$C เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า ในกรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว รูปแบบที่สามารถระบาย

ความร้อนของ CPU และ VGA Card ได้ดีที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 ที่มีการติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทาง และมีพัดลมดูดเอาอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ บริเวณด้านหลัง CPU ซึ่งจะมีอุณหภูมิของ CPU และ VGA Card อยู่ที่ 74.6 °C และ 40.1 °C ตามลำดับ และในกรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว รูปแบบที่ทำให้อุณหภูมิของ CPU ลดลงได้มากที่สุด คือ รูปแบบที่ 5 ที่มีการติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทาง ด้านบนมีการติดตั้งพัดลมสลับให้ทิศทางโดยการดูดเข้าด้านหน้าและออกด้านหลัง สามารถทำให้อุณหภูมิของ CPU อยู่ที่ 71.4 °C

Project Title : Heat transfer analysis in mid-tower computer case by finite element method

Name : Mr. Thanawat Klomlai ID.59362062

Miss.

Mr. Vasunarat Suya ID.59364981

Project Advisor : Asst. Prof. Nopparat Seehawong

Major : Mechanical Engineering

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2019

Abstract

The project aims to study the impact of computer-case cooling fan installation on the computer temperature by using finite element method. Two variables, the cooling fan position and the inlet-outlet air direction, were examined. The model validation, comparing experiment results with the Finite Element model at 40% CPU work load, shows that the root-mean-square error and the mean bias difference of the CPU were 0.76 and 0.70. These two values were less than the quadratic sum, equal to one, the finite element model was therefore acceptable. According to 28 cfm air flow rate and 25 $^{\circ}$C ambient temperature, two frontal inlet fan and one rear outlet fan installation showed the lowest CPU-VGA card temperature results, 74.6 $^{\circ}$C and 40.1 $^{\circ}$C respectively. In addition, for the case of 5 fan installation, 2 frontal inlet fans, 1 rear outlet fan, 1 top inlet fan and 1 top outlet fan setting showed the lowest CPU temperature ,71.4 $^{\circ}$C.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานด้านวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงานต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนติดตามผลการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ และ รศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบโครงร่างปริญญานิพนธ์ และเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ทั้งเป็นอาจารย์สอนที่ให้คำแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงงานในหลายๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทความรู้ แนะนำและตักเตือนแก่ผู้ดำเนินงานจนวันนี้

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงงาน

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงงานนี้ แด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงงานนี้ ผู้ดำเนินงานต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายธนวัฒน์ กลมไล
นางสาวมนัสวี พันธ์งอก
นายวสุนรัตน์ สุยะ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
แบบเสนอปริญญานิพนธ์	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญสัญลักษณ์	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	5

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation	7
2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	9
2.4 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	13
2.5 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error Propagation)	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	16
3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	17
3.2 ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์	17
3.3 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	24
3.4 วิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	28
3.5 เปลี่ยนตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้าออกของลม	30
3.6 วิเคราะห์และสรุปผล	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
4.1 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว	31
4.2 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว	42
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผล	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation	52
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	129
ภาคผนวก ค คุณสมบัติของอากาศ	157
ประวัติผู้จัดทำโครงงาน	160

สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์	22
ตารางที่ 3.2 ผลการวัดอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	29
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว	32
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว	39
ตารางที่ 4.3 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว	42
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว	45

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์	5
รูปที่ 2.2 การขึ้นรูปแบบจำลอง	7
รูปที่ 2.3 การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้	7
รูปที่ 2.4 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ	8
รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบจำลอง	8
รูปที่ 2.6 การแสดงผลการวิเคราะห์	9
รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน	9
รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนัง	10
รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของของไหล	11
รูปที่ 2.10 การแผ่รังสีความร้อน	12
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงาน	16
รูปที่ 3.2 การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ	17
รูปที่ 3.3 ด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์	18
รูปที่ 3.4 ด้านหลังของเคสคอมพิวเตอร์	19
รูปที่ 3.5 ด้านบนของเคสคอมพิวเตอร์	19
รูปที่ 3.6 ด้านข้างของเคสคอมพิวเตอร์	20
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล	20
รูปที่ 3.8 พัดลมระบายความร้อน	21

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 3.9 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์	21
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ	23
รูปที่ 3.11 การทำงานของ CPU	23
รูปที่ 3.12 เคสคอมพิวเตอร์	24
รูปที่ 3.13 เมนบอร์ด	25
รูปที่ 3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เคสคอมพิวเตอร์กับเมนบอร์ด	25
รูปที่ 3.15 คุณสมบัติของอลูมิเนียม	26
รูปที่ 3.16 คุณสมบัติของ PCB	26
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของซิลิคอน	27
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของลม	27
รูปที่ 3.19 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ	28
รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งพัดลมระบายความร้อน และทิศทางการเข้า-ออกของลม กรณี 3 พัดลม	31
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว	40
รูปที่ 4.3 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 1	40
รูปที่ 4.4 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 9	41
รูปที่ 4.5 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 17	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งพัดลมระบายความร้อน และทิศทางการเข้า-ออกของลม กรณี 5 พัดลม	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว	46
รูปที่ 4.8 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 5	46
รูปที่ 4.9 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 4	47
รูปที่ 4.10 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 2	47
รูปที่ 4.11 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 8	48

สารบัญสัญลักษณ์

$\{f\}$	Local Force Vector
$[k]$	Local Stiffness Matrix
$\{d\}$	Local Displacement Vector
q''_x	อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน $\left(W/m^2\right)$
$\frac{dT}{dx}$	ผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกน x (K)
k	Thermal conductivity เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำผนัง (W/mK)
q''	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน $\left(W/m^2\right)$
T_s	อุณหภูมิพื้นผิว (K)
$T\infty$	อุณหภูมิของของไหล (K)
h	Convection heat transfer coefficient จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของพื้นผิว การเคลื่อนที่ของของไหล และคุณสมบัติของของไหล $\left(W/m^2K\right)$
Q	อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W)
σ	ค่าคงที่สตีฟาน-โบลทซ์มันซ์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.669\times10^{-8}\ W/m^2K^4$
ε	ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ (K)

สารบัญสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_∞	อุณหภูมิโดยรอบ (K)
A	พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
M	ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
E	ผลจากการทดลอง
N	จำนวนข้อมูล

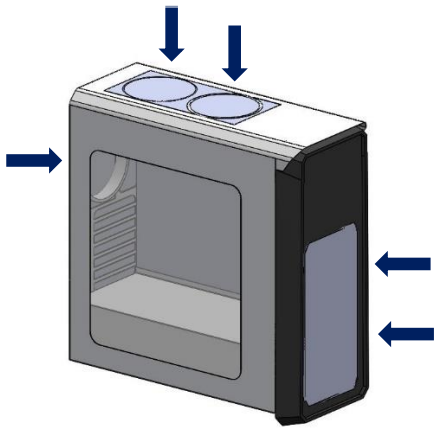
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานเพื่อความบันเทิง งานออฟฟิศทั่วไปหรืองานเฉพาะทาง เช่น งานตัดต่อวิดีโอ งานคอมพิวเตอร์กราฟิก งานเขียนแบบหรือการสร้างแบบจำลองต่างๆ เป็นต้น ในกลุ่มของการทำงานเฉพาะทาง คอมพิวเตอร์ที่ใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงและจะมีการทำงานเต็มกำลัง (Full load) เป็นระยะเวลาค่อนข้างนาน สิ่งที่ตามมา คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งเป็นสิ่งบั่นทอนประสิทธิภาพการทำงานและอายุการใช้งานของคอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์ในกลุ่มประสิทธิภาพสูง ส่วนใหญ่จะเลือกใช้งานเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ซึ่งมักจะออกแบบให้สามารถติดตั้งพัดลมขนาด 120 มิลลิเมตร ได้สูงสุด 5 ตัว แต่ใน Mainboard ส่วนมากจะออกแบบให้มีช่องจ่ายพลังงานให้พัดลม 3 ตัว ดังนั้น ในปัจจุบันยังเป็นที่สงสัยว่าจะต้องติดตั้งพัดลมในตำแหน่งใดและทิศทางใด (เข้า-ออก) จึงจะให้การระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพดีที่สุด



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน

เพื่อให้ได้ตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสมในการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ในโครงงานนี้จะทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ในลักษณะต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านการใช้งานโปรแกรม Solidworks Flow Simulation

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิส่วนต่างๆ ภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

1.3.2 ความเร็วรอบของพัดลมคงที่ที่ 1100 rpm ซึ่งมีปริมาณการไหลของอากาศ เท่ากับ 28 CFM

1.3.3 เป็นการศึกษาการส่งผ่านความร้อนในสภาวะคงตัว

1.3.4 เป็นการศึกษาการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ที่สามารถติดตั้งพัดลมระบายความร้อนได้ 5 ตัว

1.3.5 ไม่คิดผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน

1.3.6 ไม่คิดผลกระทบของแรงลม เนื่องจากพัดลมระบายความร้อนที่ CPU และ VGA Card

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเคสคอมพิวเตอร์ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนในตำแหน่งต่างๆ ที่สามารถวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์

1.4.2 ทราบถึงตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบ เพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

1.5.3 สอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ โดยการอ่านค่าความร้อนด้วยจอแสดงผลของเครื่องวัดอุณหภูมิ

1.5.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.5 เมื่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มีความถูกต้องเพียงพอ จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งและทิศทางของพัดลมระบายความร้อน และวิเคราะห์ผลการระบายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว

1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5.7 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2562					2563				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation										
3. ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์										

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

กิจกรรม	2562					2563				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
4. เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์										
5. ทำการเปลี่ยนตำแหน่งและทิศทางของพัดลมระบายความร้อน และวิเคราะห์ผลการระบายความร้อนของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว										
6. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้										
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

1.7.1 กระดาษ 200 บาท

1.7.2 จัดทำรูปเล่ม 500 บาท

1.7.3 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ 2,300 บาท

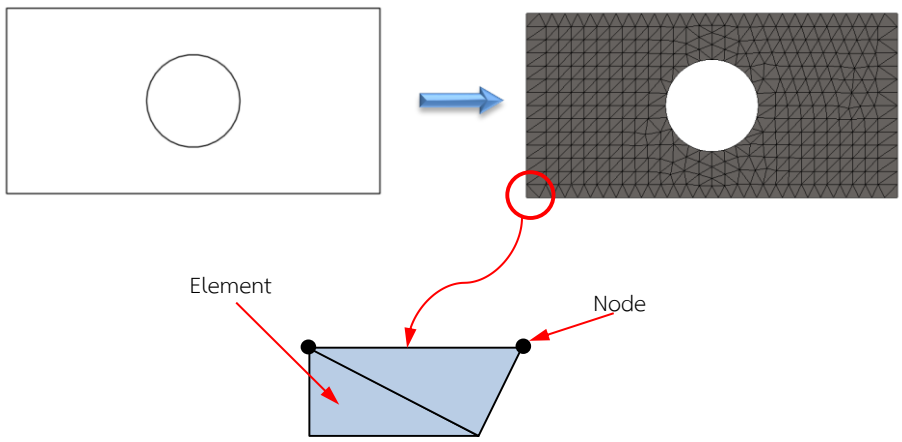
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณอุณหภูมิภายในเคสคอมพิวเตอร์มีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้โดยง่ายและสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีแนวคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านั้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างอิสระและสามารถประกอบเข้าด้วยกันกลับมาเป็นวัตถุรูปแบบเดิมได้ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสมกับปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อน ที่ไม่สามารถหาผลเฉลี่ยแม่นตรงได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะแก้ปัญหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วจากนั้นจึงใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ โดยมีหลักการและขั้นตอนดังนี้

2.1.1 แบ่งวัตถุที่พิจารณาออกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่า Element ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วย Node ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์

2.1.2 สร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ (Local Finite Element Equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของภาระ (Load) และผลที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$\{f\}=[k]\{d\} \qquad \text{.....(1)}$$

โดยที่

$\{f\}$ คือ Local Force Vector เป็น Column Matrix ของภาระที่กระทำในแต่ละ Node ในกรณีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ภาระจะเป็นแหล่งความร้อนต่างๆ ซึ่งอาจกำหนดให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิ Heat Flux ความดันหรืออัตราการไหล เป็นต้น

$[k]$ คือ Local Stiffness Matrix เป็น Matrix แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับวัตถุและผลที่เกิดขึ้น

$\{d\}$ คือ Local Displacement Vector เป็น Column Matrix ของผลที่เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ผลที่เกิดขึ้นจะเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ Node ต่างๆ

2.1.3 รวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทั้งแบบจำลอง (Global Finite Element Equation)

$$\begin{aligned} &\{f\}=[k]\{d\} \\ &\quad\cdots \\ &\{f\}=[k]\{d\} \\ &\quad\cdots \\ &\{f\}=[k]\{d\} \end{aligned} \quad\Rightarrow\quad \{F\}=[K]\{D\} \qquad \text{.....(2)}$$

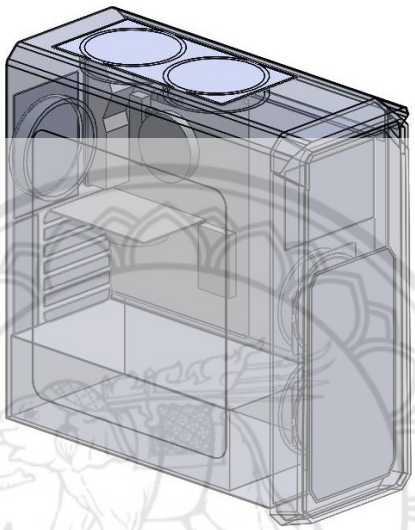
2.1.4 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต

2.1.5 แก้ระบบสมการเพื่อหา $\{D\}$ ซึ่งในกรณีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน $\{D\}$ คือ อุณหภูมิที่ Node ต่างๆ

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation

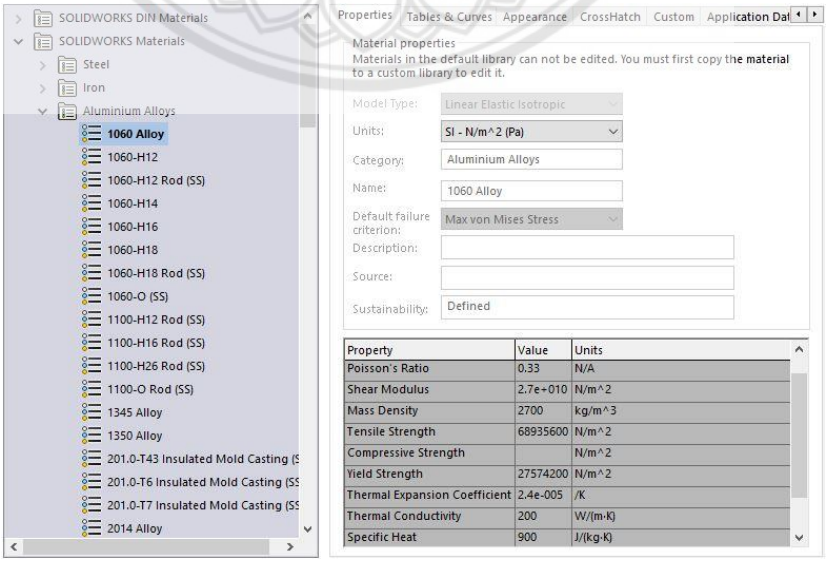
2.2.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลองเพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์ (Pre-processing)

ก. การขึ้นรูปแบบจำลอง



รูปที่ 2.2 การขึ้นรูปแบบจำลอง

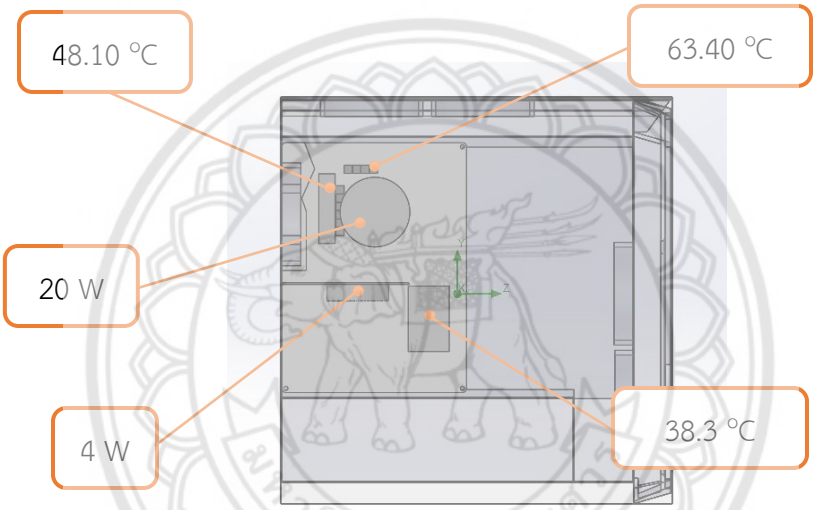
ข. การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้



รูปที่ 2.3 การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

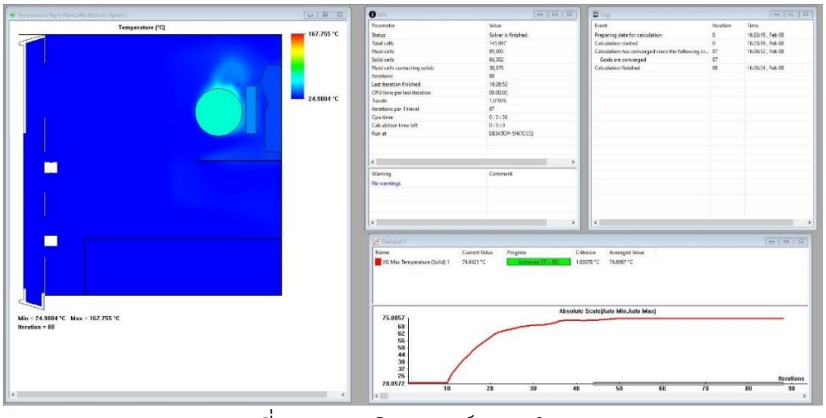
ค. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ให้แบบจำลอง โดยในกรณีการศึกษานี้ จะกำหนดให้มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัวและ 5 ตัว ที่มีความเร็วรอบ 1100 rpm อุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส และจุดที่มีอากาศสามารถถ่ายเทได้อย่างอิสระ

ง. การกำหนดชนิดของภาระที่มากระทำกับแบบจำลอง ซึ่งในกรณีศึกษานี้ภาระที่กระทำคือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้าในการทำงานของคอมพิวเตอร์



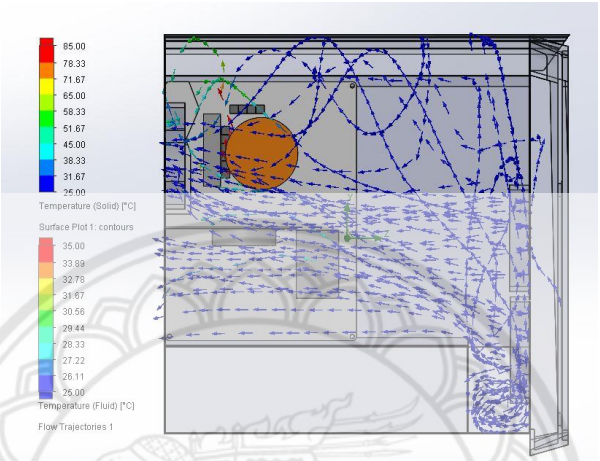
รูปที่ 2.4 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ

2.2.2 ขั้นตอนของการวิเคราะห์แบบจำลอง (Processing)



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบจำลอง

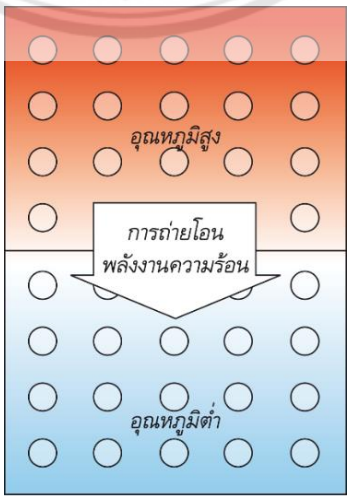
2.2.3 ขั้นตอนของการแสดงผลการวิเคราะห์ (Post-processing) เป็นการนำเอาผลของการวิเคราะห์ที่ได้มาแสดงในรูปของกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นกรณีที่มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.6 การแสดงผลการวิเคราะห์

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

2.3.1 การนำความร้อน คือ การถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าภายในสสาร ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ เมื่อตัวกลางมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

ซึ่งมีสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ดังนี้

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} \qquad \text{.....(3)}$$

โดยที่

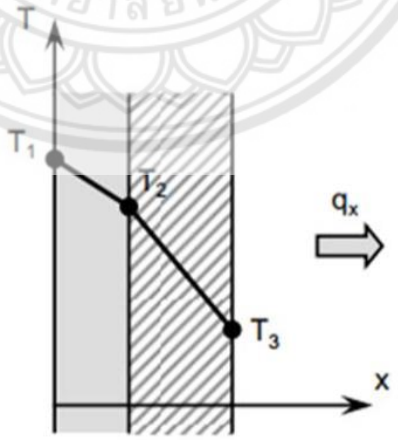
q''_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน $\left(W/m^2\right)$

$\frac{dT}{dx}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกน x $\left(K\right)$

k คือ Thermal conductivity เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำผนัง $\left(W/mK\right)$

เครื่องหมาย (-) แสดงว่าการถ่ายเทความร้อนอยู่ในทิศทางการลดลงของอุณหภูมิ

ภายใต้สภาวะ Steady-state และการกระจายอุณหภูมิเป็นเส้นตรง การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นดังรูปที่ 2.8



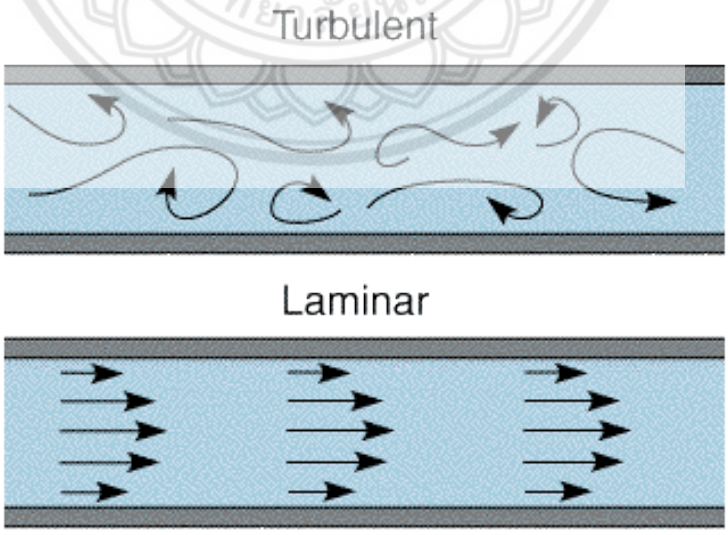
รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนัง

ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนผ่านผนังพื้นที่ A คือ $q_x\left(W\right) = q''_x \cdot A$

2.3.2 การพาความร้อน คือ การที่อนุภาคเกิดการถ่ายเทพลังงานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของอนุภาค โดยจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวกับของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวจะเป็นตัวพาความร้อนไป การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

ก. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or Free Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกบังคับให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก เมื่ออุณหภูมิที่พื้นผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเคลื่อนที่มายังของไหลที่ติดกับพื้นผิว ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่ติดกับพื้นผิวลดลง จึงส่งผลให้ของไหลลอยตัวสูงขึ้นแล้วเกิดการแทนที่ของของไหลที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

ข. การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของของไหลแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในการไหลแบบราบเรียบ ของไหลจะแบ่งออกเป็นชั้นๆ โดยเคลื่อนที่ขนานกับความร้อน และจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของของแข็งไปยังของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิว แล้วของไหลจะถ่ายเทความร้อนต่อไปผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ของไหลจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของของไหล

สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \qquad \text{.....(4)}$$

โดยที่

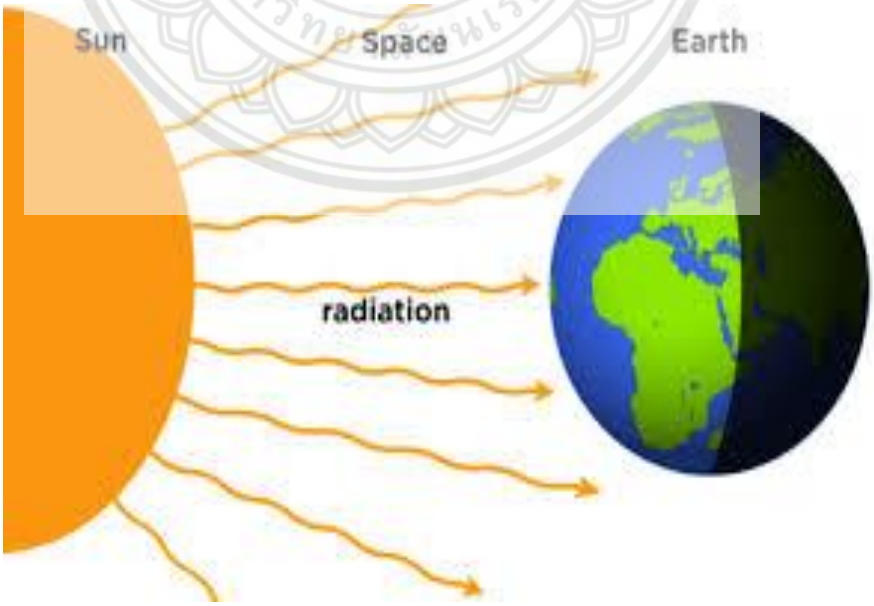
q'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน $\left(W/m^2\right)$

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล (K)

h คือ Convection heat transfer coefficient จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของพื้นผิว การเคลื่อนที่ของของไหล และคุณสมบัติของของไหล $\left(W/m^2K\right)$

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการแผ่รังสีของพื้นผิวไปยังบริเวณพื้นที่โดยรอบที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท ซึ่งจะแผ่พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.10 การแผ่รังสีความร้อน

สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

$$Q = \sigma \varepsilon A\left(T_s - T_\infty\right)^4 \qquad \text{.....(5)}$$

โดยที่

Q คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W)

σ คือ ค่าคงที่สตีฟาน-โบลทซ์มันซ์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.669 \times 10^{-8}\ W/m^2K^4$

ε คือ ค่าการแผ่รังสี (Emissivity)

T_s คือ อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิโดยรอบ (K)

A คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน $\left(m^2\right)$

โดยในการศึกษาโครงงานครั้งนี้จะไม่นำผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อนมาใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีมีค่าน้อยมาก

2.4 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) คือ ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบจากค่าที่เป็นจริงและถูกต้อง

สมการเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อน

$$\text{Percentage error} = \frac{|M - E|}{E} \times 100\% \qquad \text{.....(6)}$$

โดยที่

M คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E คือ ผลจากการทดลอง

2.5 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error Propagation)

2.5.1 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)

ก. ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ดูได้จากการตรวจวัดค่าโดยตรง โดยปกติแล้วผู้ผลิตเครื่องมือจะเป็นคนกำหนดค่านี้กำกับในแต่ละผลิตภัณฑ์ หรือในกรณีที่ไม่ได้กำหนดและเครื่องมือมีลักษณะเป็นเครื่องมือวัดแบบมีขีดแสดง ให้ถือว่าครึ่งหนึ่งของขีดที่เล็กที่สุดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ เช่น

$$T = 23 \pm 0.5^{\circ}C$$

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ คือ $\pm 0.5^{\circ}C$

ข. ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่นำมาเปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัด เช่น

$T = 23 \pm 0.5^{\circ}C$ เทียบเป็น $T = 23 \pm 2.17\%$

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ คือ $\pm 2.17\%$

2.5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสมวิธี Step by Step คือ การนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาทำการคำนวณ ซึ่งแต่ค่าก็จะมีค่าความคลาดเคลื่อนของตัวเอง จะมีวิธีการคำนวนหาค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของแต่ละตัวแปร โดยการหาค่า Quadratic Sum

สมการการหาค่า Quadratic Sum

$$Q = \sqrt{(\delta X_1)^2 + (\delta X_2)^2 + \ldots + (\delta X_n)^2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(7)$$

สำหรับการวิเคราะห์ Quadratic Sum ในกรณีตัวแปรต้นบวกหรือลบกัน ให้หา Quadratic Sum จากค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ และในกรณีตัวแปรต้นคูณหรือหารกัน ให้หา Quadratic Sum จากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

2.5.3 ค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference

ก. Root Mean Square Error (RMSE) คือ ค่าที่แสดงถึงผลต่างโดยเฉลี่ยระหว่างข้อมูล

สมการการหาค่า Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum\left(M_i - E_i\right)^2}{N}} \qquad \text{.....(8)}$$

โดยที่

M_i คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E_i คือ ผลจากการทดลอง

N คือ จำนวนข้อมูล

ข. Mean Bias Difference (MBD) คือ ค่าแสดงผลต่างโดยเฉลี่ยของข้อมูล โดยจะบ่งบอกถึงแนวโน้มของผลที่ได้จากแบบจำลองว่ามากหรือน้อยกว่าผลจากการทดลอง

สมการการหาค่า Mean Bias Difference

$$MBD = \frac{\sum\left(M_i - E_i\right)}{N} \qquad \text{.....(9)}$$

โดยที่

M_i คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E_i คือ ผลจากการทดลอง

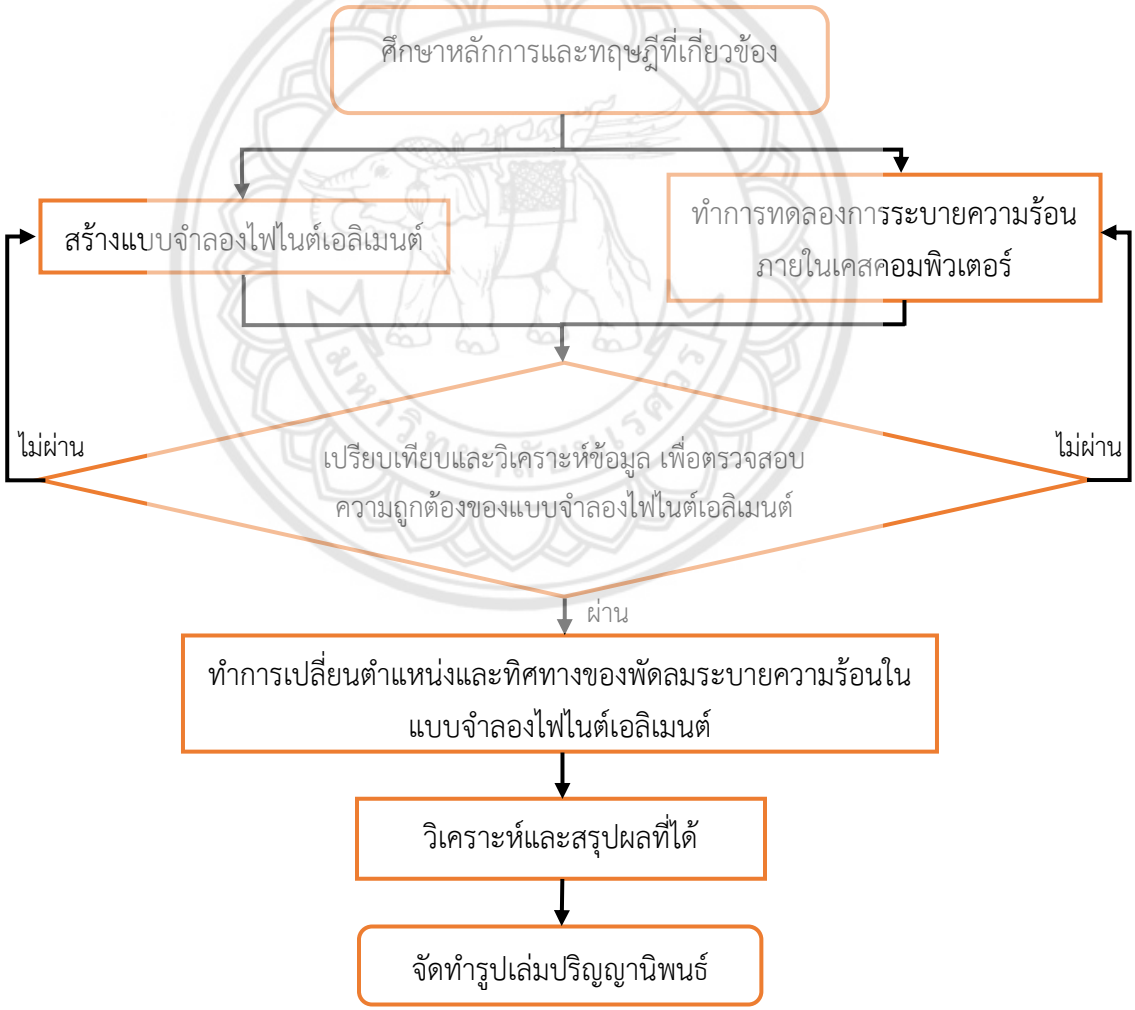
N คือ จำนวนข้อมูล

เมื่อค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference ถูกคำนวณออกมามีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum ทั้ง 2 ค่า แสดงว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องและค่าความคลาดเคลื่อนสะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานของโครงงาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน โดยทำการศึกษาดังนี้

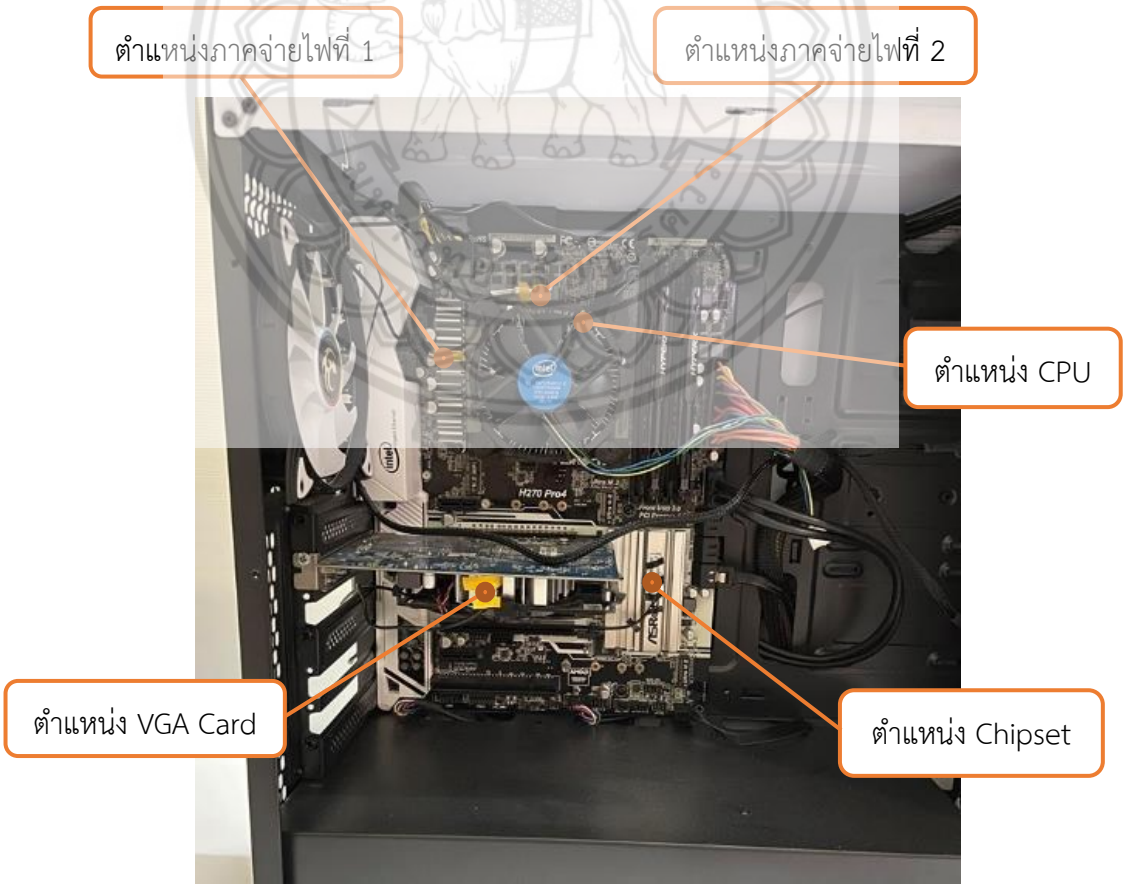
3.1.1 ศึกษาทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.2 ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.1.2 ศึกษาทฤษฎีค่าความคลาดเคลื่อนสะสม

3.2 ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์

การทดลองระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ด้วยพัดลมระบายความร้อน โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ของเมนบอร์ด



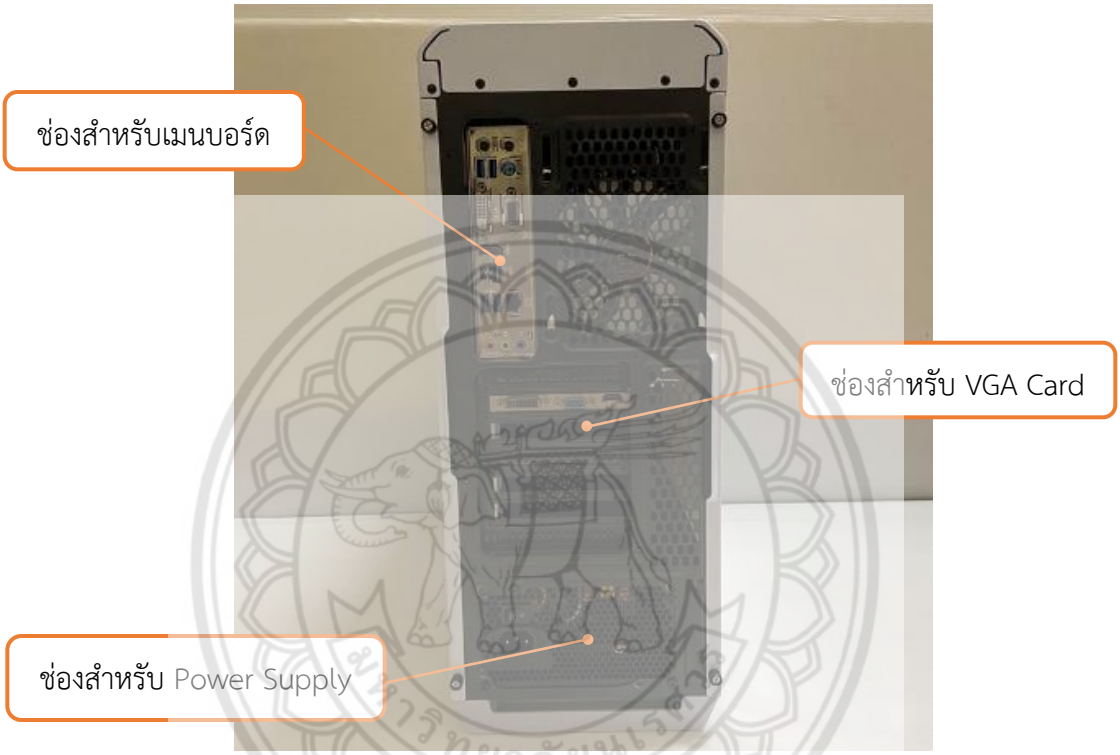
รูปที่ 3.2 การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ

3.2.1 อุปกรณ์ในการทำการทดลอง

ก. เคสคอมพิวเตอร์ขนาด mid-tower ยาว 478 mm กว้าง 200 mm สูง 472 mm ประกอบด้วย ด้านหน้าเป็นพลาสติกส่วนบนเป็นแผ่นทึบ 2 ช่อง สำหรับติดตั้ง CD-ROM Drive ส่วนล่างเป็นรูพรุน ที่มีตำแหน่งการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ขนาด 120 mm 2 ตัว

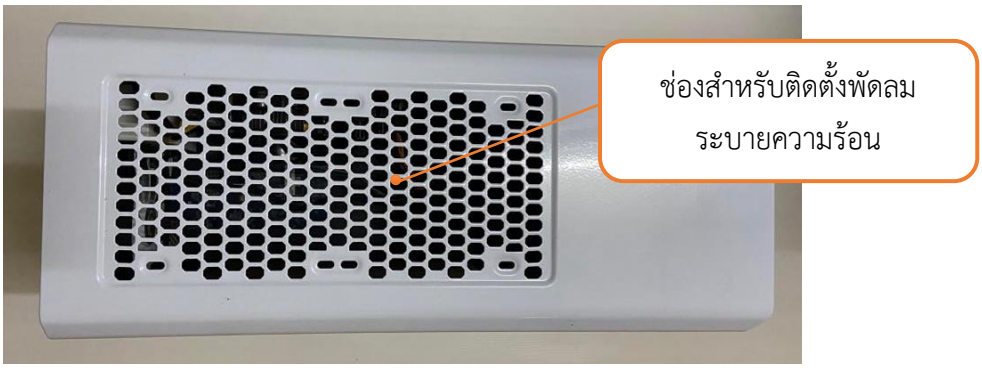
รูปที่ 3.3 ด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์

ด้านหลังเป็น Steel ชุบเคลือบสีดำ ส่วนบนเป็นรูพรุนสำหรับติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm 1 ตัว และมีช่องสำหรับเมนบอร์ด ส่วนกลางเป็นช่องสำหรับ VGA Card ส่วนล่างเป็นรูพรุนสำหรับติดตั้ง Power Supply 1 ตัว



รูปที่ 3.4 ด้านหลังของเคสคอมพิวเตอร์

ด้านบนเป็น Steel ชุบเคลือบสีขาว มีส่วนที่เป็นรูพรุนสำหรับติดตั้งพัดลมระบายความร้อน ขนาด 120 mm 2 ตัว



รูปที่ 3.5 ด้านบนของเคสคอมพิวเตอร์

ด้านข้างประกอบด้วย ส่วนที่เป็น Steel ชุบเคลือบสีขาว และส่วนที่เป็นพลาสติกใส

รูปที่ 3.6 ด้านข้างของเคสคอมพิวเตอร์

ข. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1^{\circ}C$

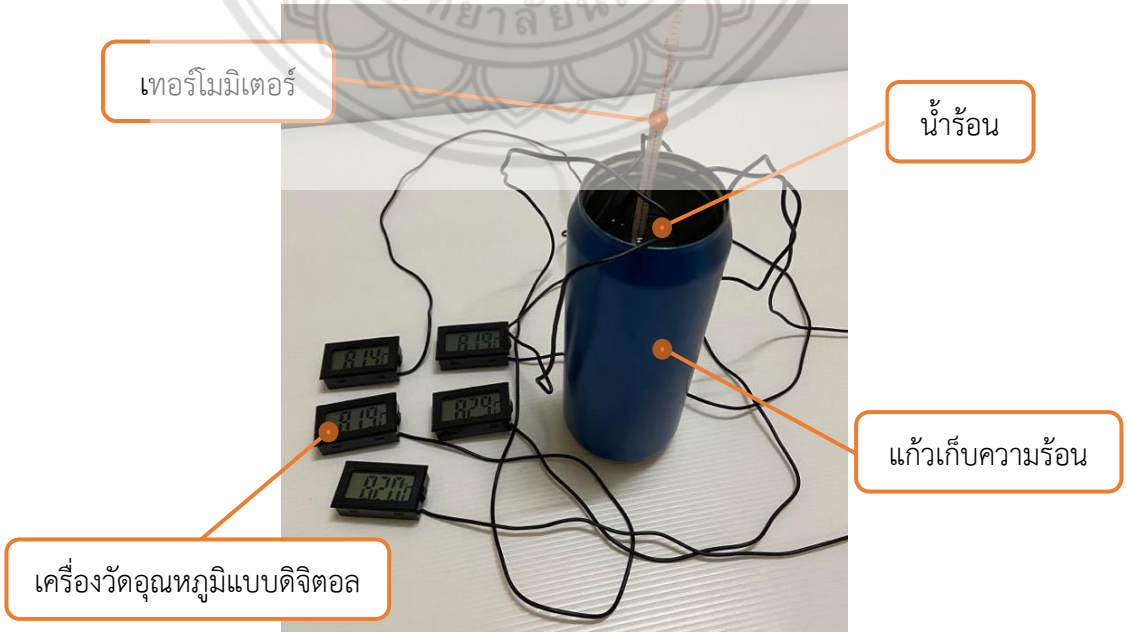
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล

ค. พัดลมระบายความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm ความเร็วรอบ 1100 rpm และอัตราการไหล 28 CFM

รูปที่ 3.8 พัดลมระบายความร้อน

3.2.2 วิธีการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ด้วยพัดลมระบายความร้อน

ก. สอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 3.9 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์

เทอร์โมมิเตอร์ (°C)	ตัววัดอุณหภูมิตัวที่ 1 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิตัวที่ 2 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิตัวที่ 3 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิตัวที่ 4 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิตัวที่ 5 (°C)
78	79.9	79.8	79.8	79.7	79.9
76	77.9	77.5	78.0	77.9	77.9
71	72.6	73.0	72.3	72.8	72.5
67	68.6	68.6	69.0	68.9	69.0
64	65.8	65.4	65.6	65.7	65.4
60.5	61.8	61.7	61.9	61.8	61.9
58	59.4	59.1	59.3	59.4	59.9
54	55.9	55.9	55.7	56.0	55.8
50.7	51.9	51.8	51.7	51.9	51.9
48	49.8	49.8	49.9	49.7	49.9
%ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	2.66	2.50	2.59	2.69	2.75

สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของตัววัดอุณหภูมิแต่ละตัวได้จากสมการ

$$\text{Percentage error} = \frac{|M - E|}{E} \times 100\%$$

จะได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัววัดอุณหภูมิแต่ละตัวดังตาราง

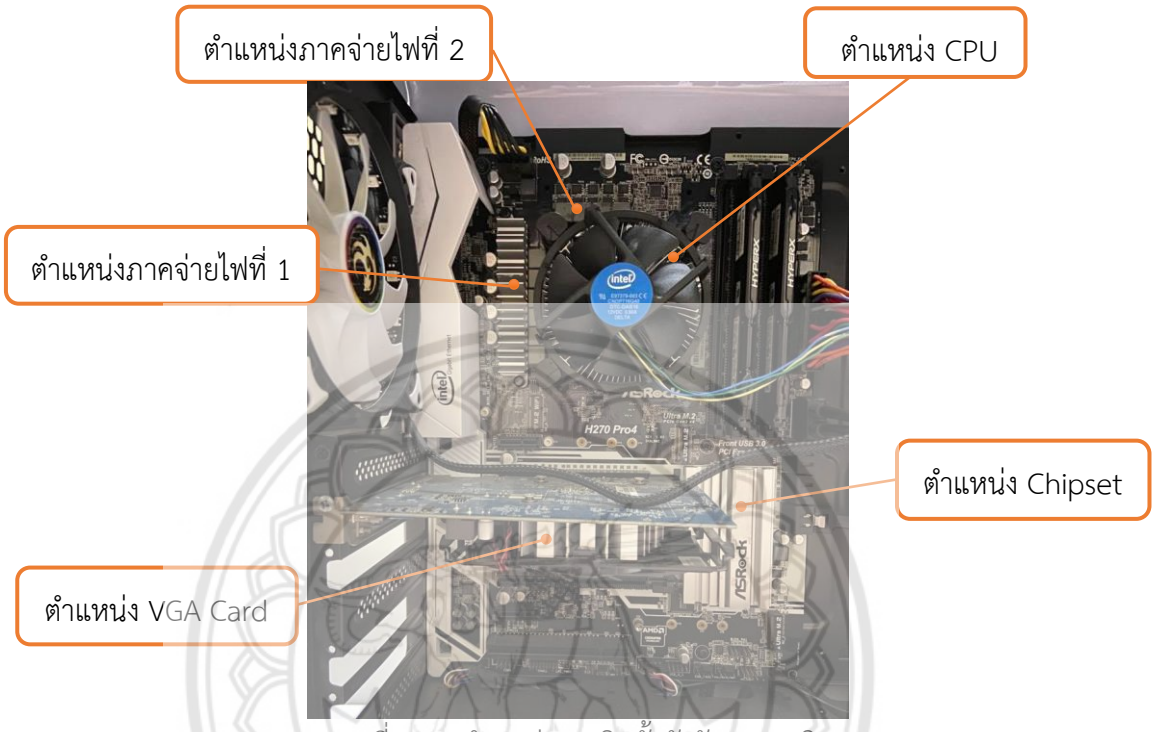
จากการทดลองที่ได้สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมของตัววัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}$$

นำค่าแทนลงในสมการ จะได้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวม} = \frac{2.66 + 2.50 + 2.59 + 2.69 + 2.75}{5} = 2.64\%$$

ค. นำอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไปติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ

ง. ทำการใช้งาน CPU คอมพิวเตอร์ให้ทำงานที่ประมาณ 40% โดยใช้โปรแกรม Minecraft เป็นตัวทำให้โหลดคงที่

รูปที่ 3.11 การทำงานของ CPU

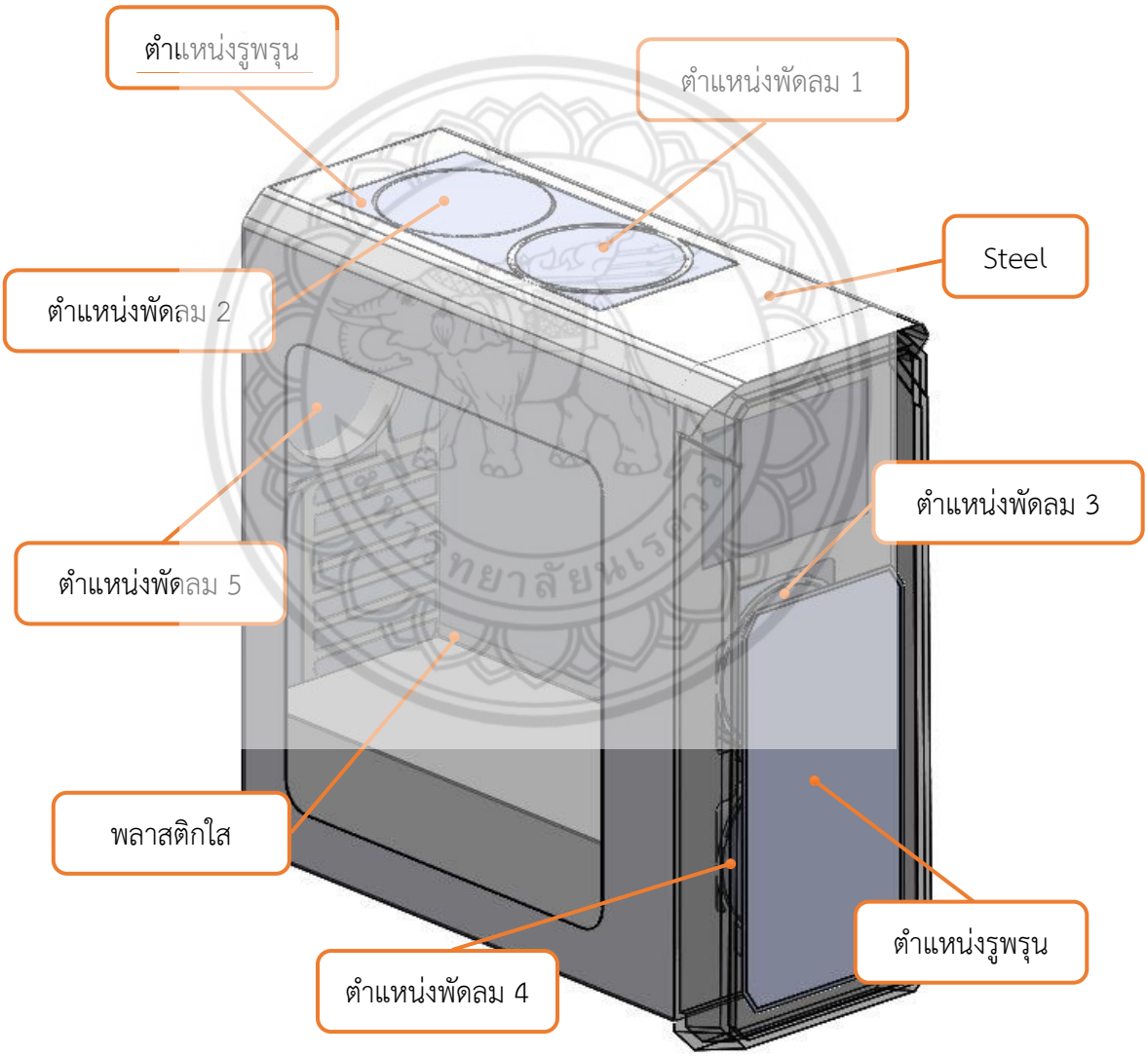
จ. เมื่ออุณหภูมิคงที่ทำการบันทึกผล เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเคสคอมพิวเตอร์

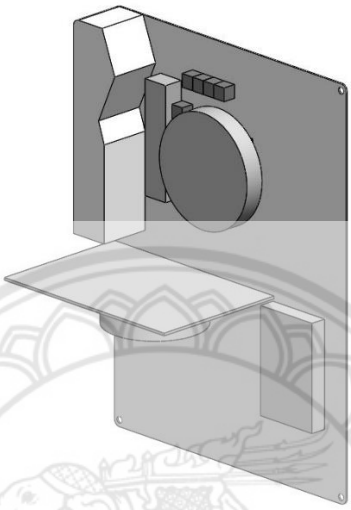
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการสร้างด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation โดยมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

ก. เคสคอมพิวเตอร์ ขนาด ยาว 478 mm กว้าง 200 mm 472 mm มีลักษณะดังนี้



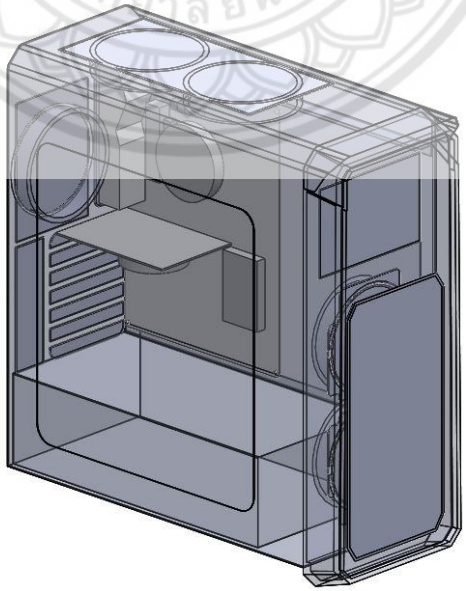
รูปที่ 3.12 เคสคอมพิวเตอร์

ข. เมนบอร์ด (Mainboard) ส่วนของบอร์ด ขนาด กว้าง 305 mm ยาว 225 mm หนา 2 mm ส่วนของ CPU ทำจากซิลิคอน และส่วนของภาคจ่ายไฟทำจากอลูมิเนียม มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.13 เมนบอร์ด

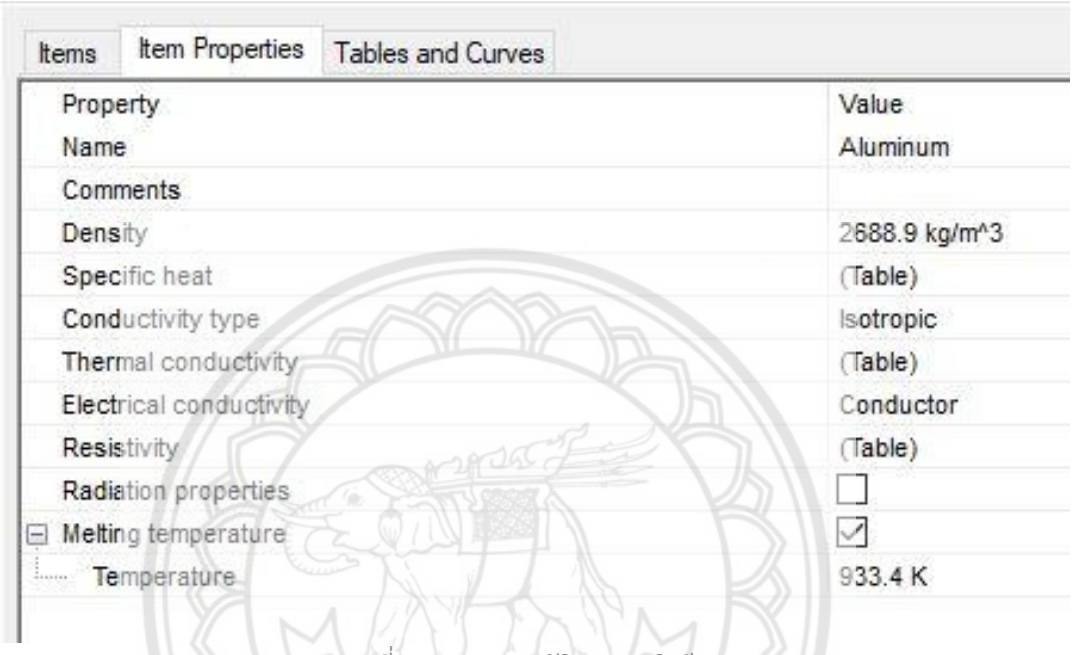
ค. ประกอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เคสคอมพิวเตอร์กับเมนบอร์ด



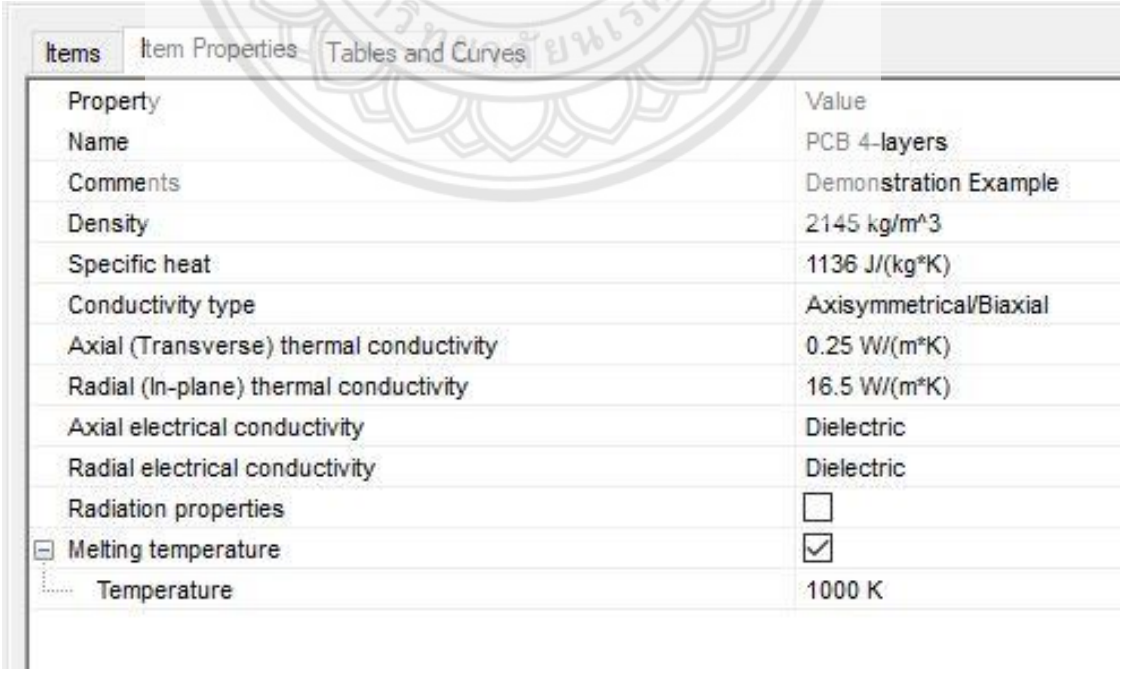
รูปที่ 3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เคสคอมพิวเตอร์กับเมนบอร์ด

3.3.2 กำหนดคุณสมบัติและสภาวะเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ก. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.15 คุณสมบัติของอลูมิเนียม



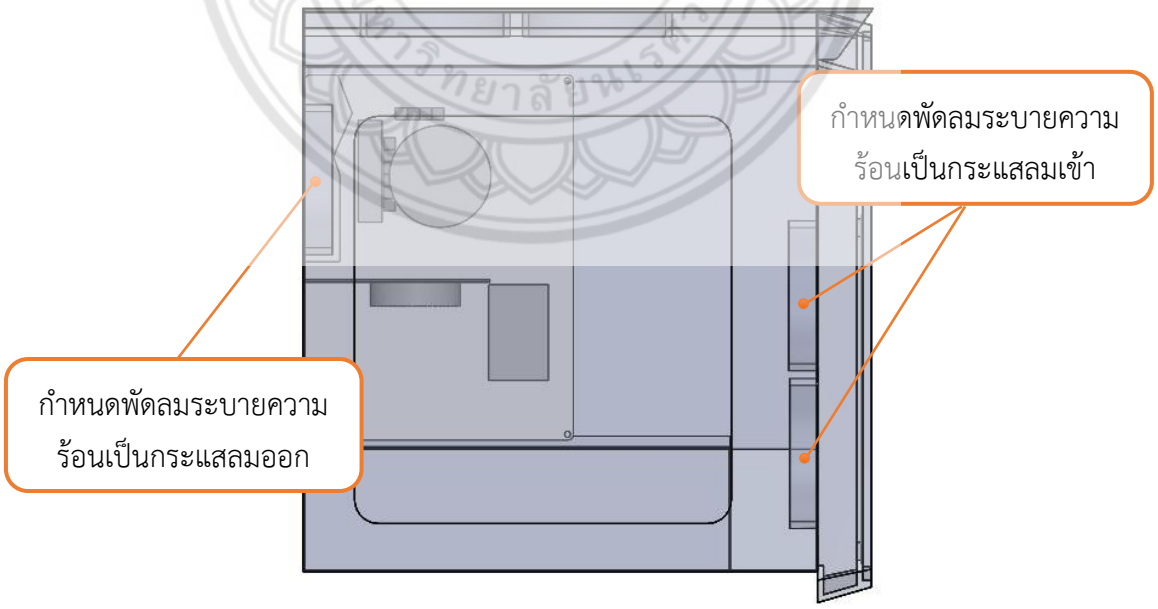
รูปที่ 3.16 คุณสมบัติของ PCB

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	Silicon
Comments	
Density	2330 kg/m^3
Specific heat	(Table)
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	(Table)
Electrical conductivity	Dielectric
Radiation properties	☐
Melting temperature	☑
Temperature	1688.2 K

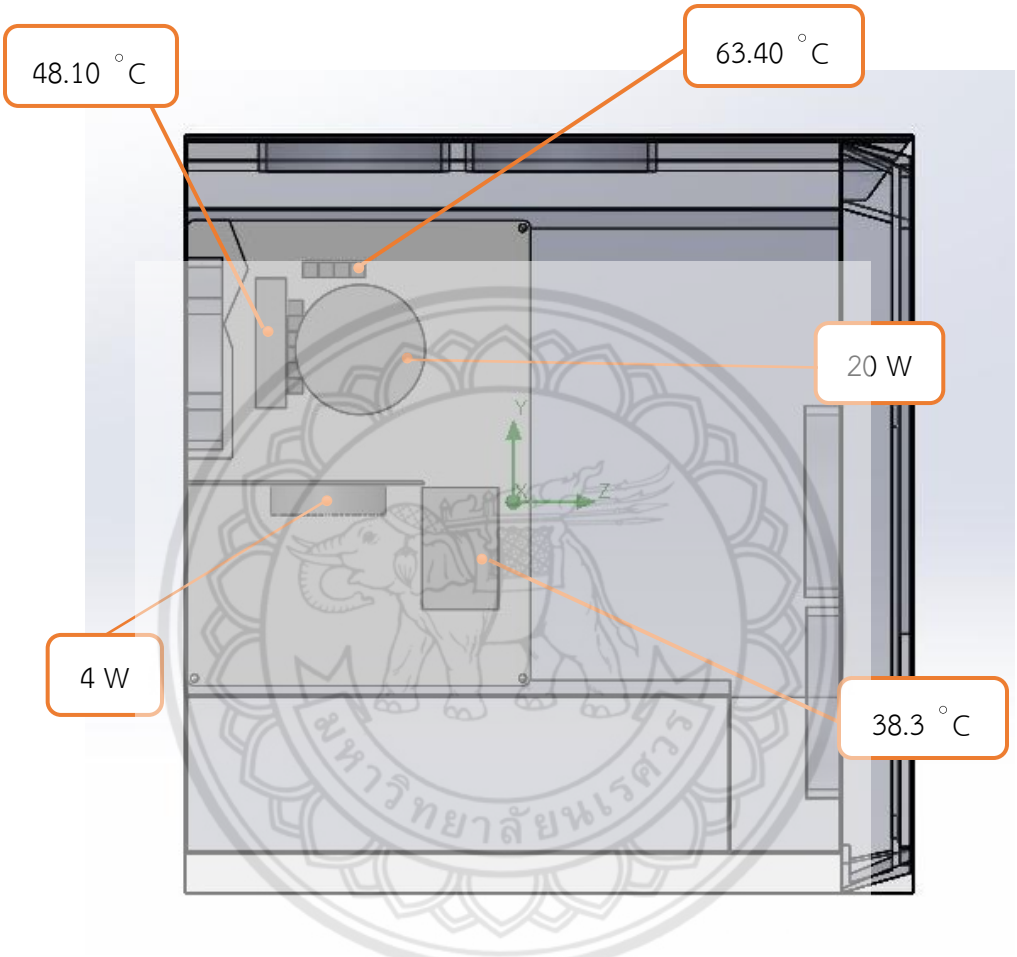
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของซิลิคอน

ข. กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของลม

ค. การกำหนดชนิดของภาระที่มากระทำกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในกรณีศึกษานี้ภาระที่กระทำคือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้าในการทำงานของคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.19 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ

3.4 วิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณหาความแม่นยำของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลอง โดยการคำนวณหาค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference เพื่อนำไปเทียบกับค่า Quadratic Sum ซึ่งในกรณีศึกษานี้ค่า Quadratic Sum มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากตัววัดอุณหภูมิมีความคลาดเคลื่อนสะสมเฉลี่ยที่ 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นในกรณีศึกษานี้ค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference ต้องน้อยกว่า 1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จำนวนครั้ง	อุณหภูมิจากการทดลอง : E (^{o}C)	อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ : M (^{o}C)	M-E	$(M-E)^2$
1	74.1	74.6	0.5	0.25
2	74.5	74.9	0.4	0.16
3	73.6	74.8	1.2	1.44
4	74.4	74.9	0.5	0.25
5	73.8	74.7	0.9	0.81
รวม			3.5	2.91

สามารถคำนวณหาค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference ได้ดังนี้

$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{\sum\left(M_i - E_i\right)^2}{N}} = \sqrt{\frac{2.91}{5}}$$

$$\text{Root Mean Square Error} = 0.76$$

และ

$$\text{Mean Bias Difference} = \frac{\sum\left(M_i - E_i\right)}{N} = \frac{3.50}{5}$$

$$\text{Mean Bias Difference} = 0.70$$

จากการคำนวณพบว่าค่า Root Mean Square Error ที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิของ CPU เท่ากับ 0.76 และค่า Mean Bias Difference ที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU เท่ากับ 0.70 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum ที่เท่ากับ 1 ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องและค่าความคลาดเคลื่อนสะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

3.5 เปลี่ยนตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้าออกของลม

เมื่อได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความถูกต้องแล้ว ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนตามตำแหน่งต่างๆ และทิศทางการเข้า-ออกของลม เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของ CPU ที่มีผลกระทบมาจากตำแหน่งการติดตั้งของพัดลมระบายความร้อน และทิศทางการเข้า-ออกของลม โดยสภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งกำหนดให้ปริมาณการไหลของอากาศ เท่ากับ 28 CFM และอุณหภูมิภายนอกเป็น 25 $^{\circ}$C

3.6 วิเคราะห์และสรุปผล

นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกันของแต่ละกรณี ว่าตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของลมแบบใด ที่ทำให้อุณหภูมิของ CPU มีค่าต่ำที่สุด และแบบใดที่ทำให้อุณหภูมิของ CPU มีค่าสูงที่สุด

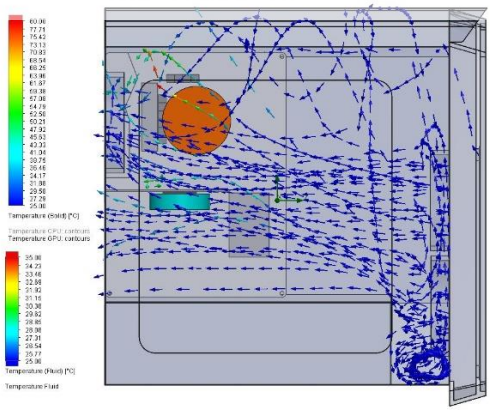
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ที่จำหน่ายในท้องตลาด ส่วนใหญ่จะออกแบบให้สามารถติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm ได้ 5 ตัว แต่ในขณะเดียวกันเมนบอร์ดขนาด ATX ที่นิยมใช้คู่กับเคสคอมพิวเตอร์ขนาดนี้ มักจะออกแบบให้มีจุดจ่ายไฟสำหรับพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว จึงเป็นเหตุให้การติดตั้งพัดลมระบายความร้อนที่นิยมติดตั้ง จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัวและการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโครงงานนี้ จะทำการวิเคราะห์โดยยึดรูปแบบการติดตั้งพัดลม 2 รูปแบบนี้เป็นหลัก

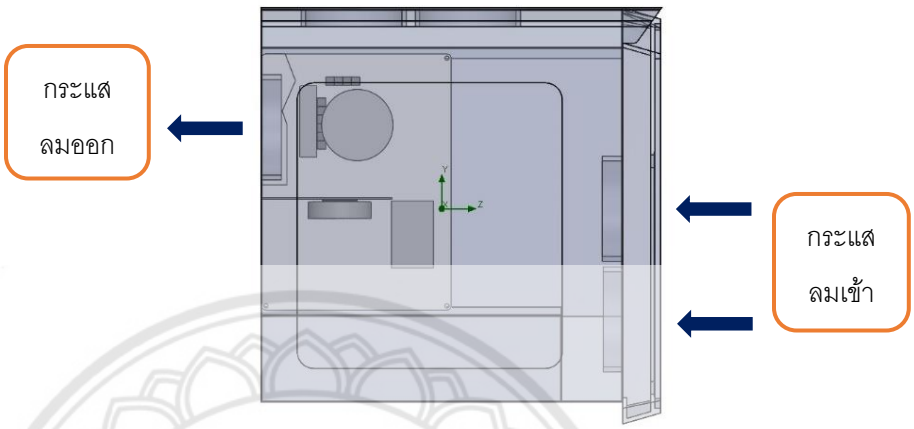
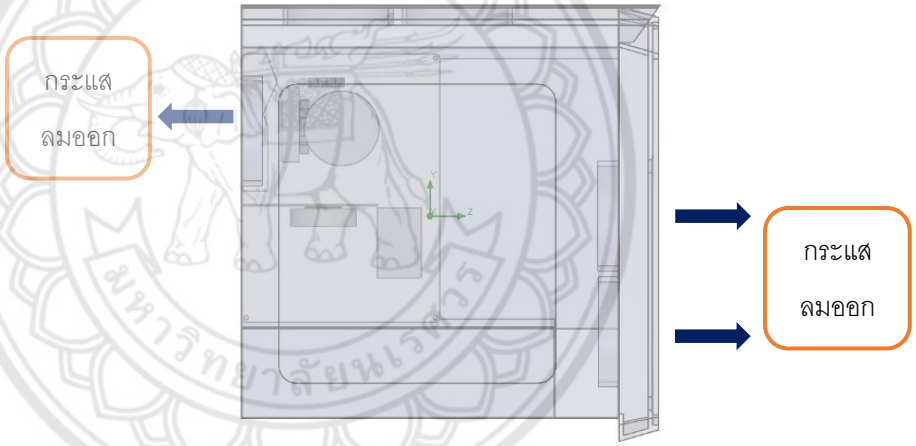
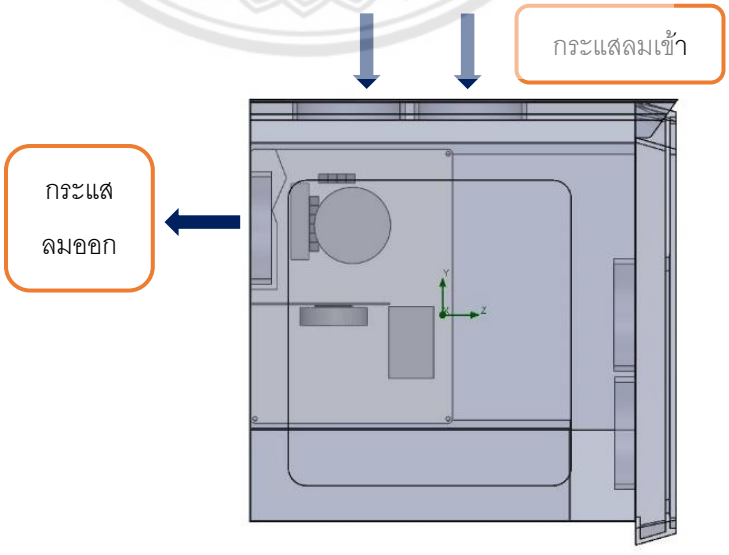
4.1 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว

การวิเคราะห์การระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower โดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm จำนวน 3 ตัว ในโครงงานจะมีรูปแบบการติดตั้งทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ดังนี้ คือ

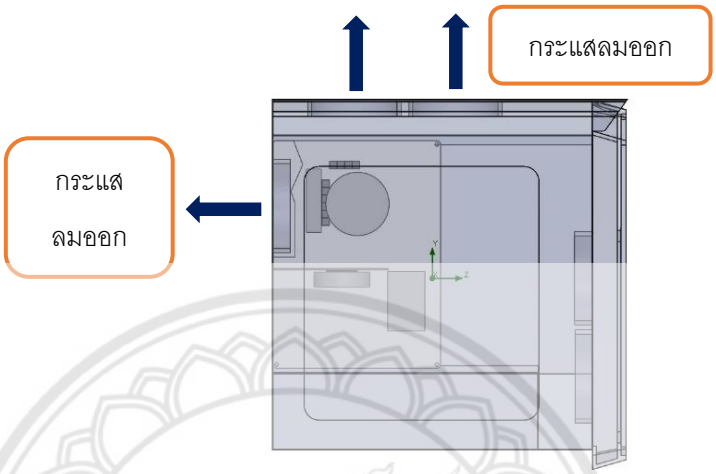
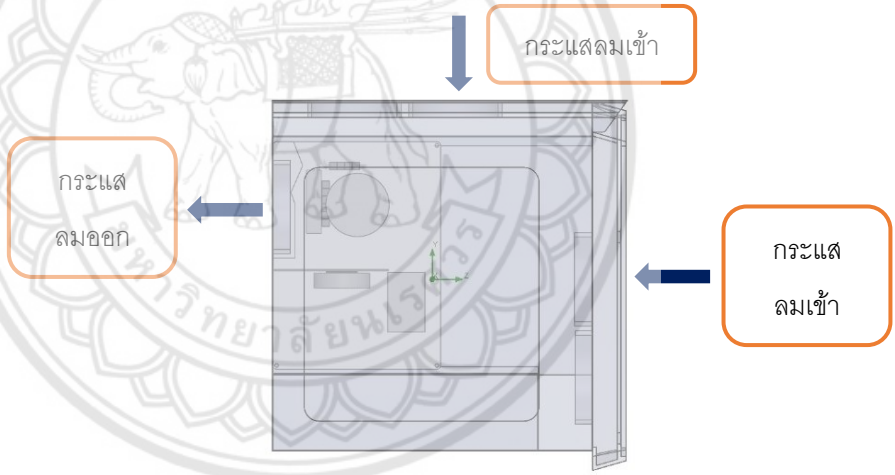
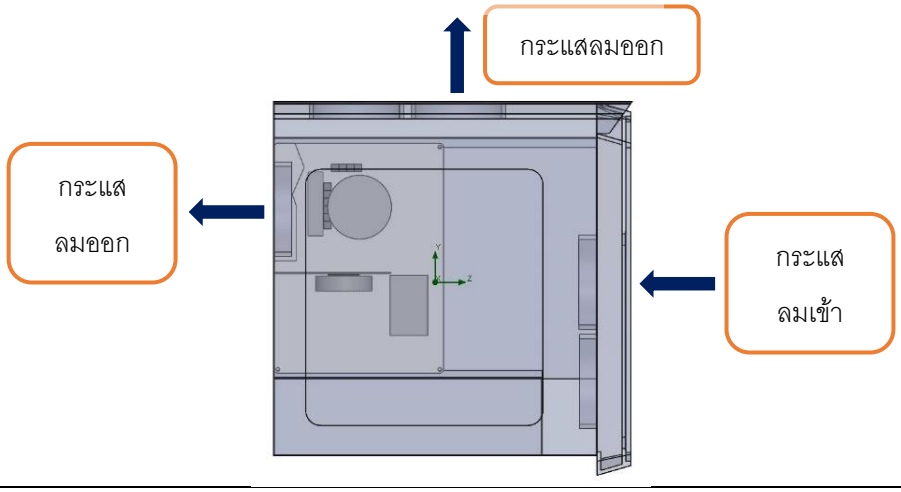


รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งพัดลมระบายความร้อน
และทิศทางการเข้า-ออกของลม กรณี 3 พัดลม

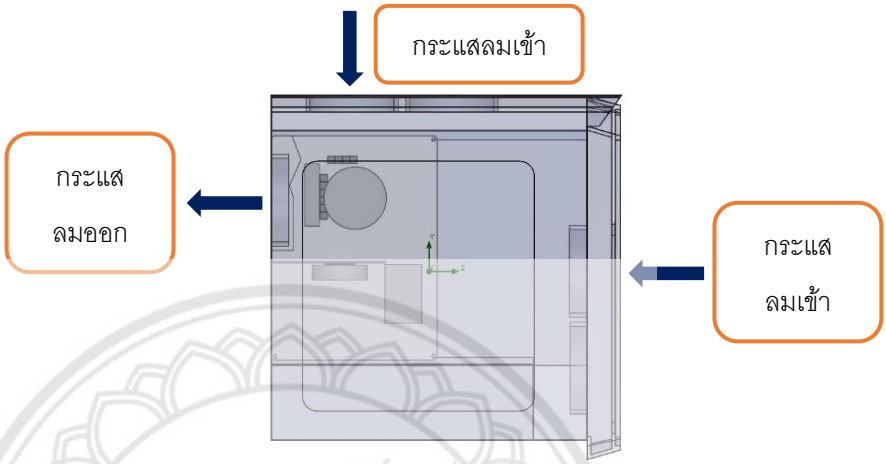
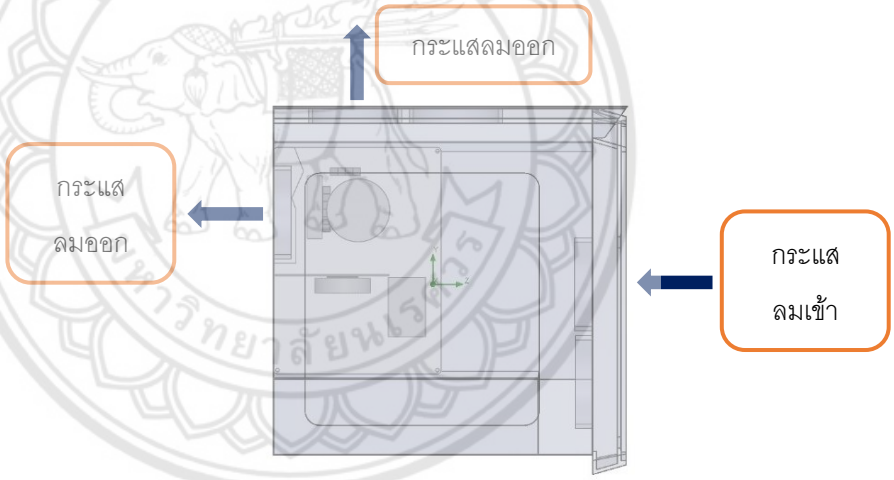
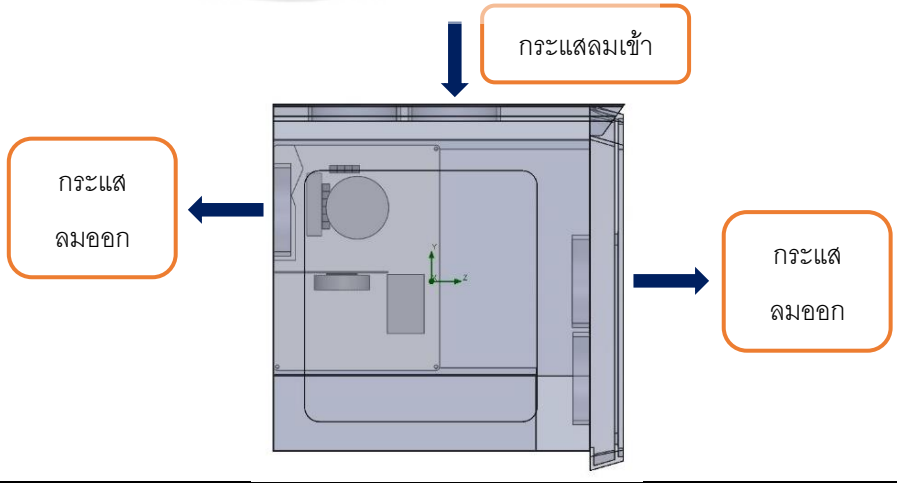
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 1	
รูปแบบที่ 2	
รูปแบบที่ 3	

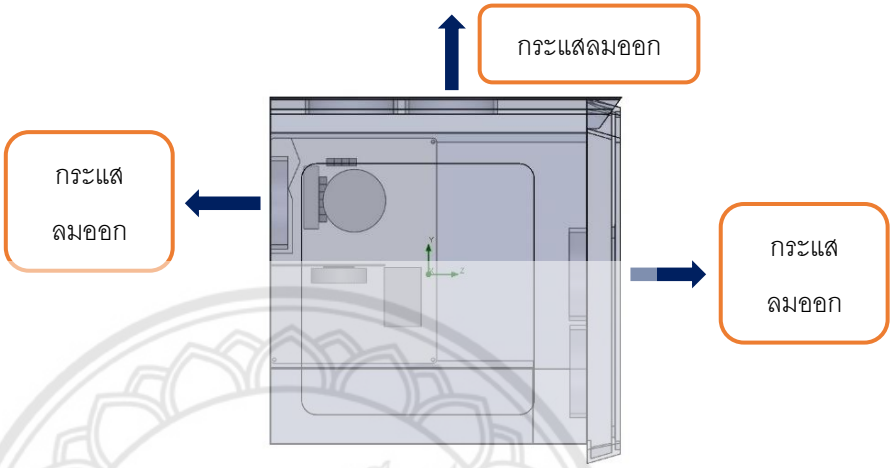
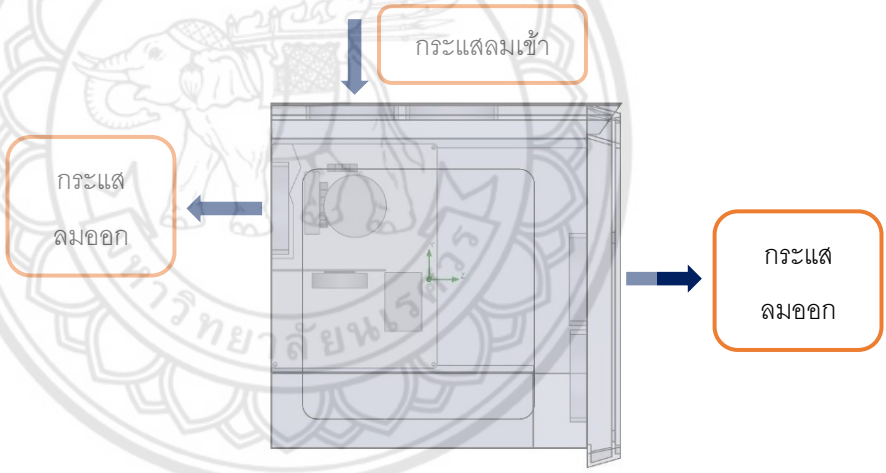
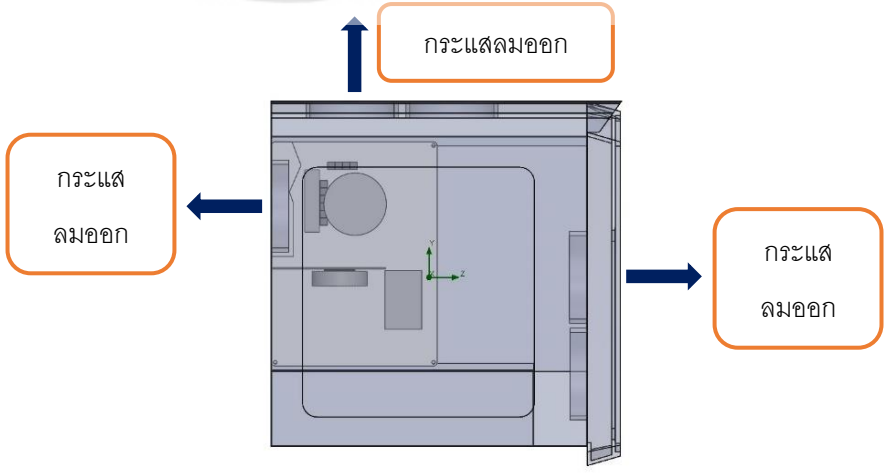
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 4	
รูปแบบที่ 5	
รูปแบบที่ 6	

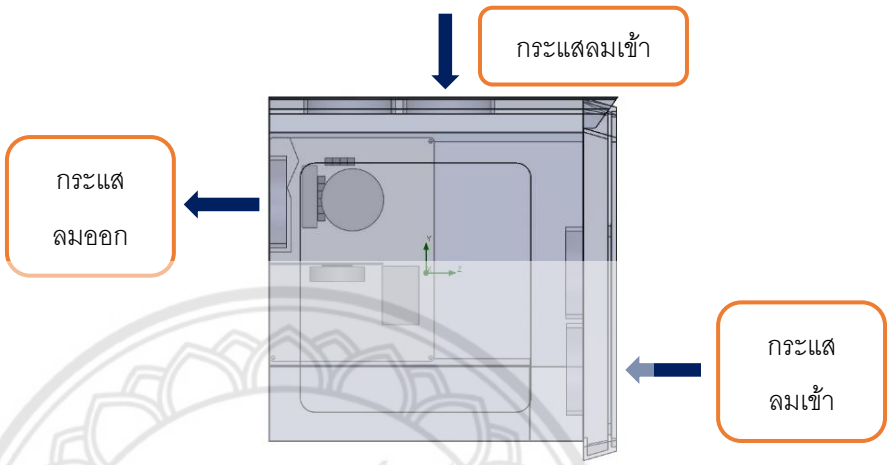
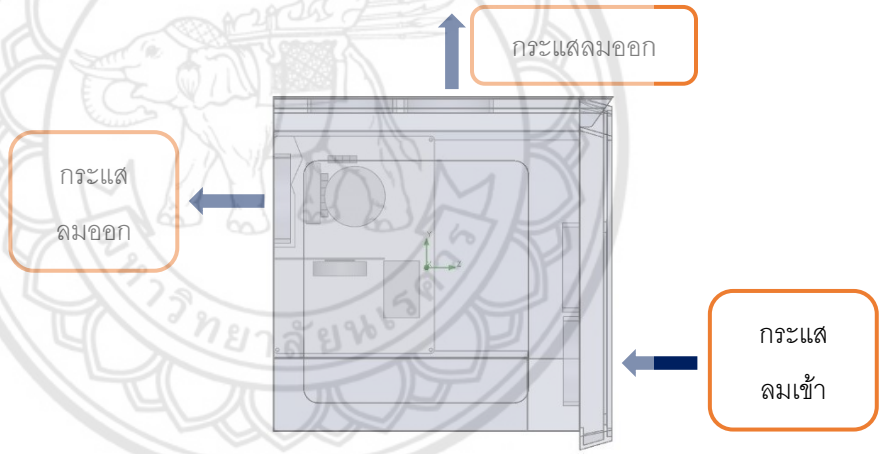
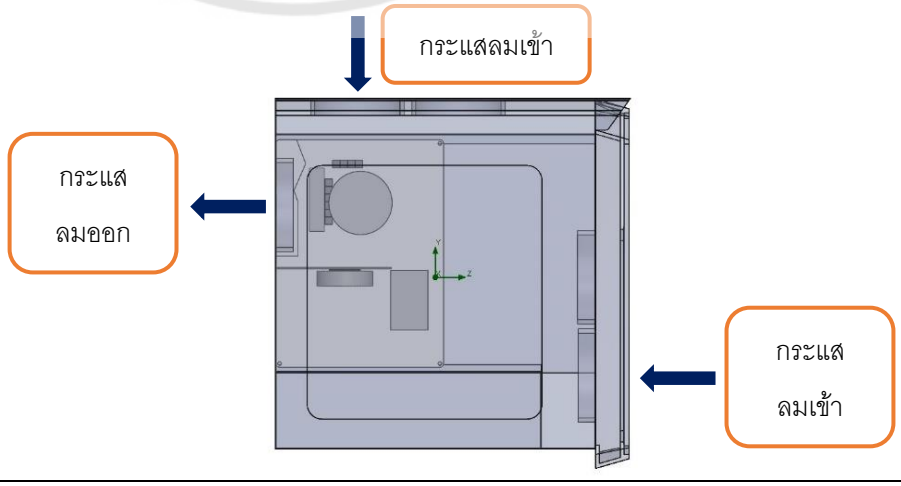
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 7	
รูปแบบที่ 8	
รูปแบบที่ 9	

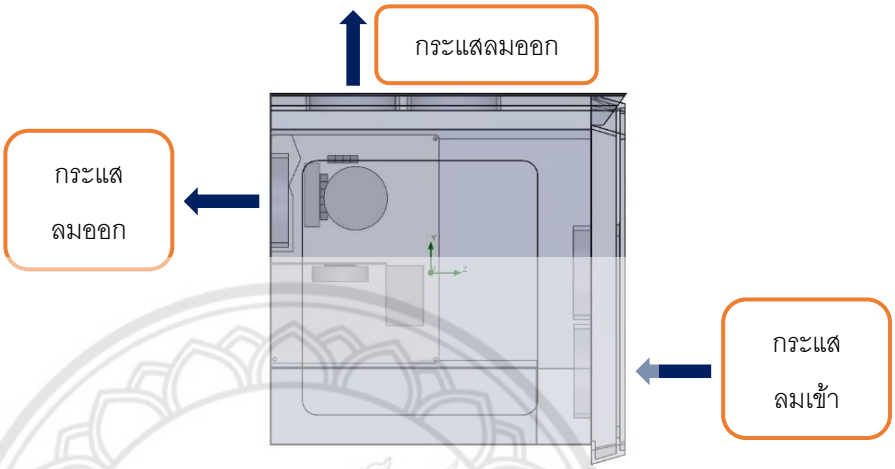
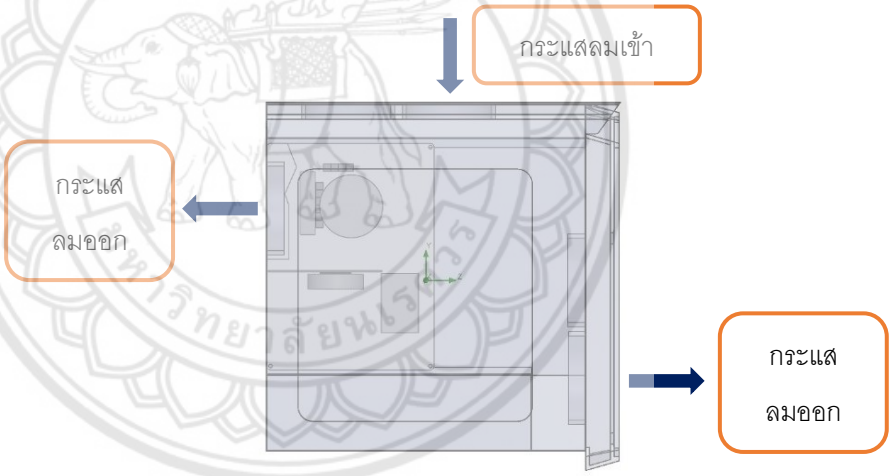
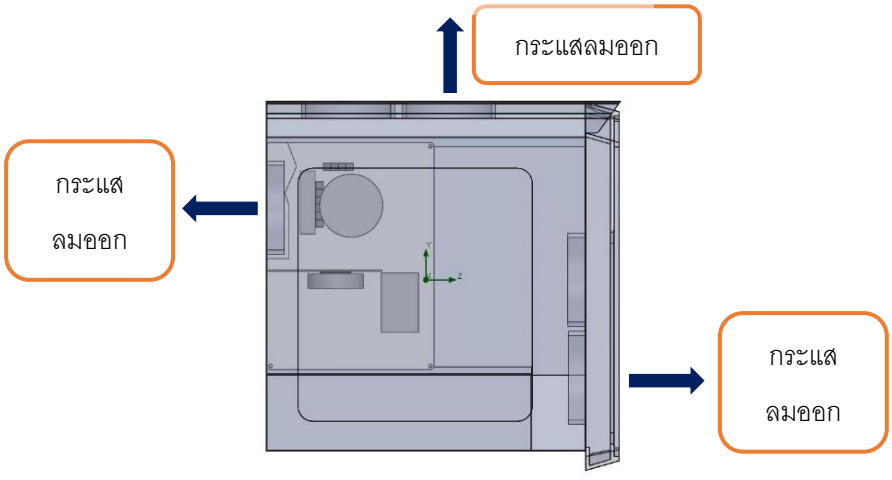
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 10	
รูปแบบที่ 11	
รูปแบบที่ 12	

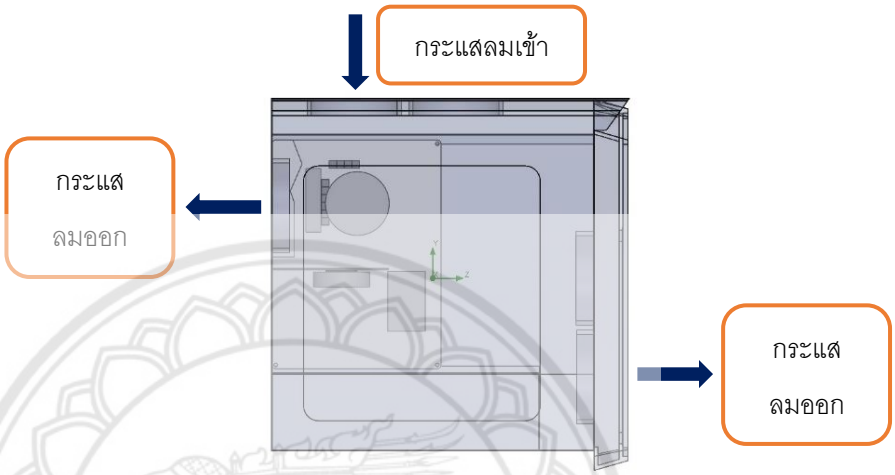
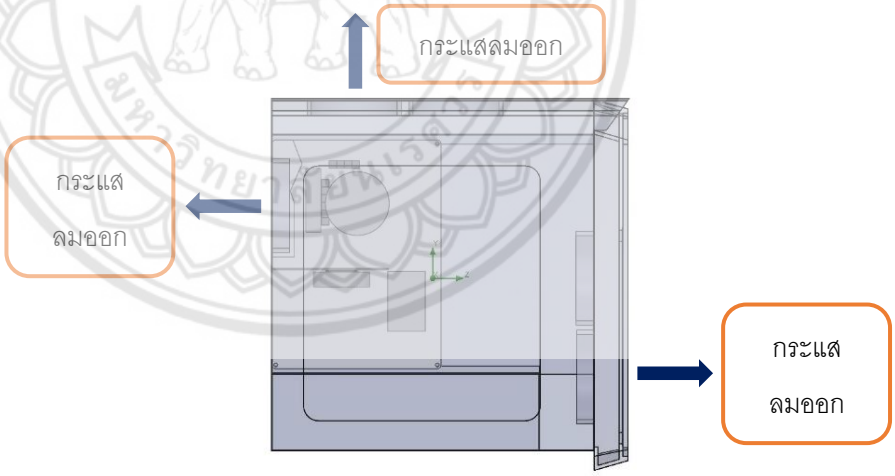
ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 13	
รูปแบบที่ 14	
รูปแบบที่ 15	

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 16	
รูปแบบที่ 17	
รูปแบบที่ 18	

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว (ต่อ)

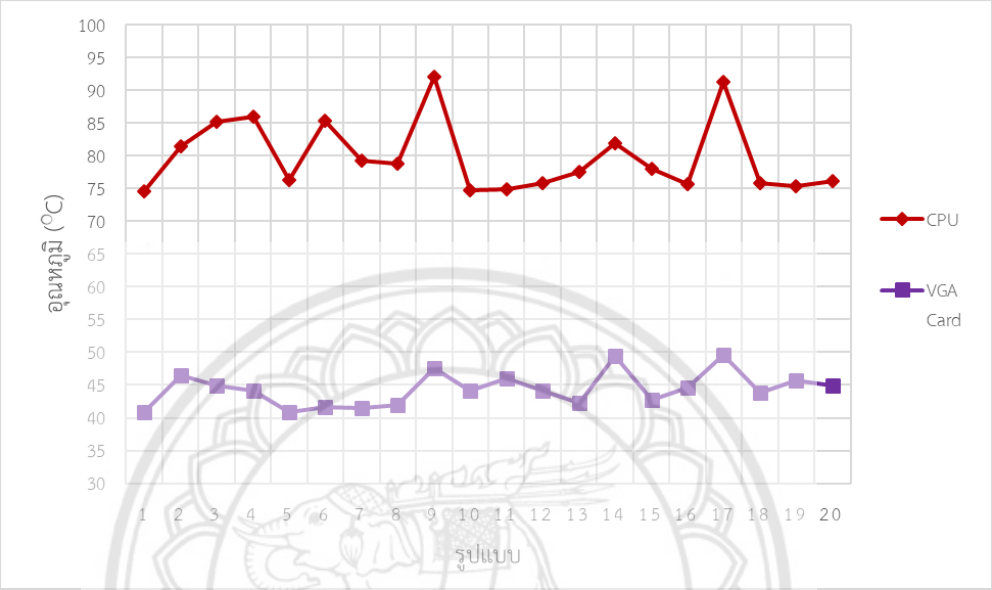
รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 19	
รูปแบบที่ 20	

จากรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนทั้งหมด เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลของอุณหภูมิของจุดต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว

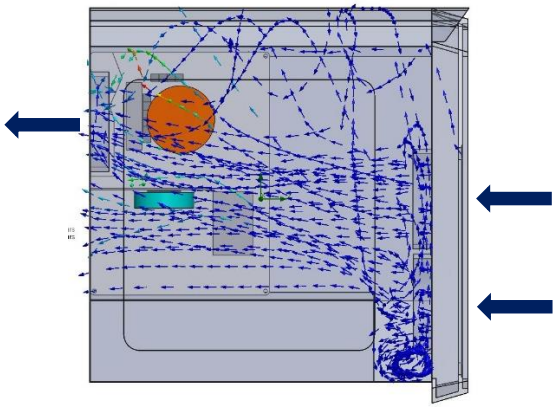
รูปแบบ	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	
	CPU	VGA Card
1	74.6	40.8
2	81.4	46.5
3	85.2	44.9
4	85.9	44.2
5	76.2	40.9
6	85.4	41.7
7	79.3	41.5
8	78.8	41.9
9	92.1	47.6
10	74.7	44.2
11	74.8	46.0
12	75.9	44.1
13	77.5	42.2
14	81.9	49.5
15	78.1	42.8
16	75.7	44.6
17	91.2	49.6
18	75.8	43.8
19	75.4	45.7
20	76.1	44.9

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของจุดต่างๆ ได้ ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว

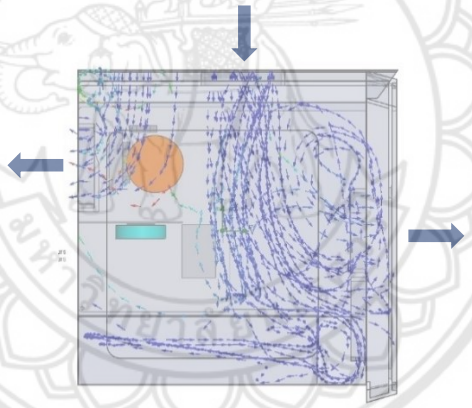
จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าการติดตั้งพัดลม 3 ตัว ในรูปแบบที่ 1 โดยให้ติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทางและมีพัดลมดูดเอาอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ บริเวณด้านหลัง CPU จะมีการระบายความร้อนได้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิของ CPU และ VGA Card อยู่ที่ 74.6 °C และ 40.1 °C ตามลำดับ



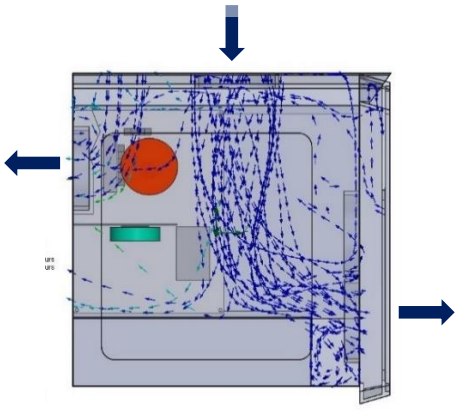
รูปที่ 4.3 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 1

เมื่อพิจารณารูปแบบการติดตั้ง 1-4 จะพบว่าในกรณีการติดตั้งพัดลมคู่ ทั้งทางด้านหน้าหรือด้านบน การติดตั้งโดยการดูดอากาศเย็นเข้าไประบายความร้อนภายในตัวเคสคอมพิวเตอร์ จะให้ผลของการระบายความร้อนได้ดีกว่าการติดตั้งพัดลมเพื่อดูดอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิกรณีการติดตั้งรูปแบบที่ 1 เปรียบเทียบกับ 2 หรือ 3 เปรียบเทียบ 4

ในกรณีที่ติดตั้งพัดลมแยกไว้ด้านบนและด้านหน้า ด้านละ 1 ตัว จะมีการติดตั้งหลายรูปแบบที่ยังคงสามารถระบายความร้อนในส่วนของ CPU ได้เป็นอย่างดี เช่น รูปแบบที่ 5 10 11 12 16 18 19 และ 20 หากแต่อุณหภูมิในส่วนของ VGA Card อาจสูงขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามรูปแบบที่ควรหลีกเลี่ยงในการติดตั้ง คือ รูปแบบที่ 9 และ 17 เนื่องจากทิศทางการไหลของอากาศเย็นจะถูกพัดลมบังคับให้ไหลออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์โดยไม่สัมผัสกับบริเวณที่มีความร้อนสูง จึงไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆยังคงมีความร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการติดตั้งพัดลมแบบอื่นๆ



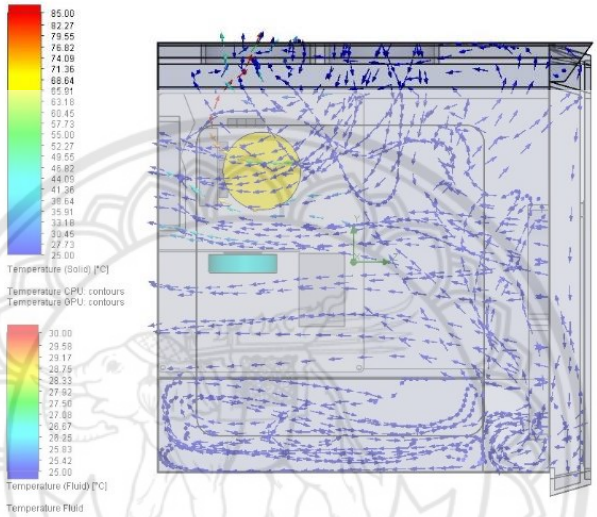
รูปที่ 4.4 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 9



รูปที่ 4.5 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 17

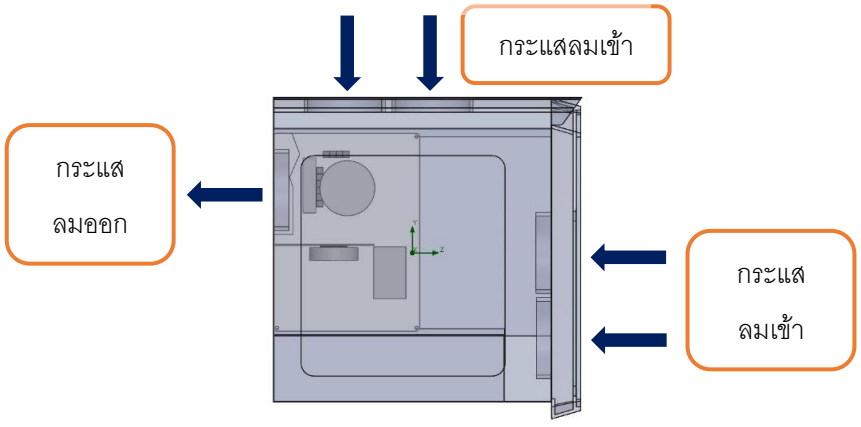
4.2 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

การวิเคราะห์การระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower โดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm จำนวน 5 ตัว ในโครงงานจะมีรูปแบบการติดตั้งทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ดังนี้ คือ

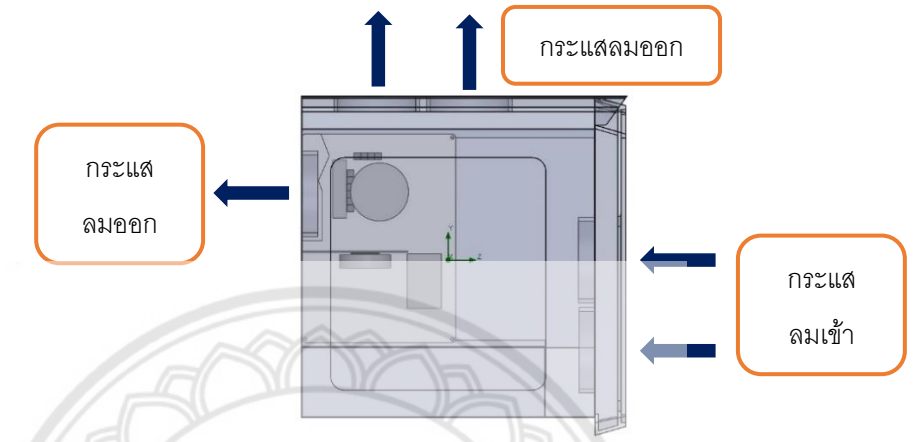
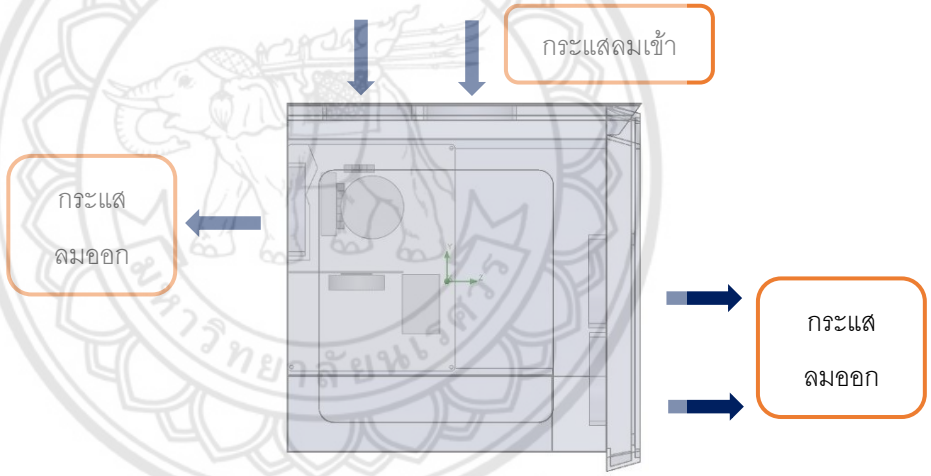
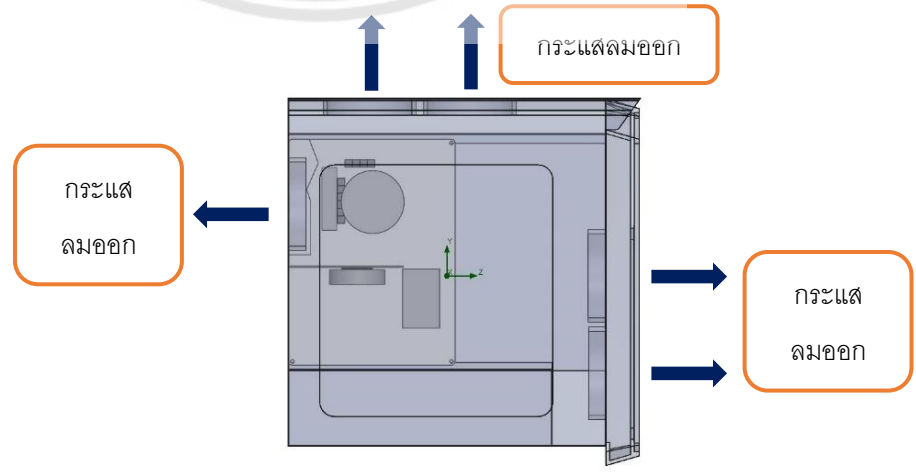


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งพัดลมระบายความร้อน และทิศทางการเข้า-ออกของลม กรณี 5 พัดลม

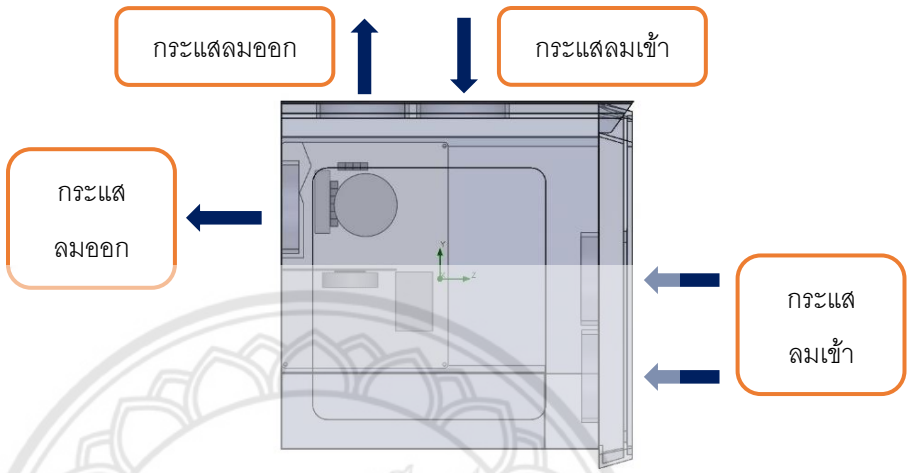
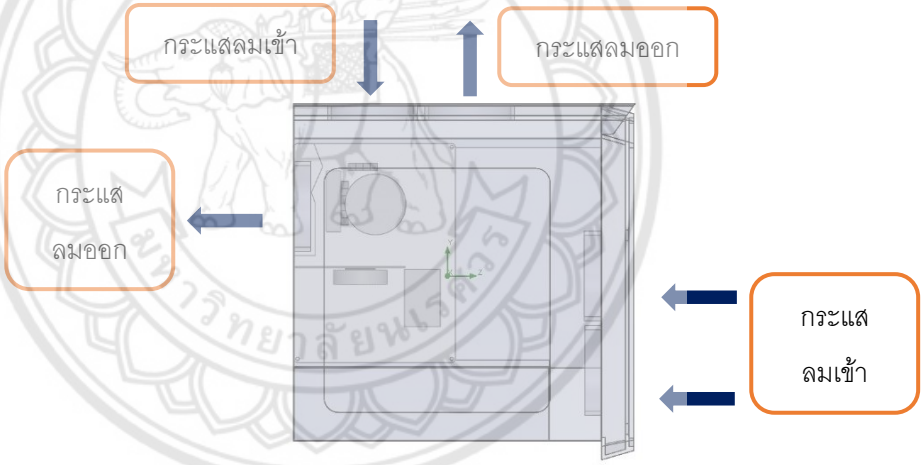
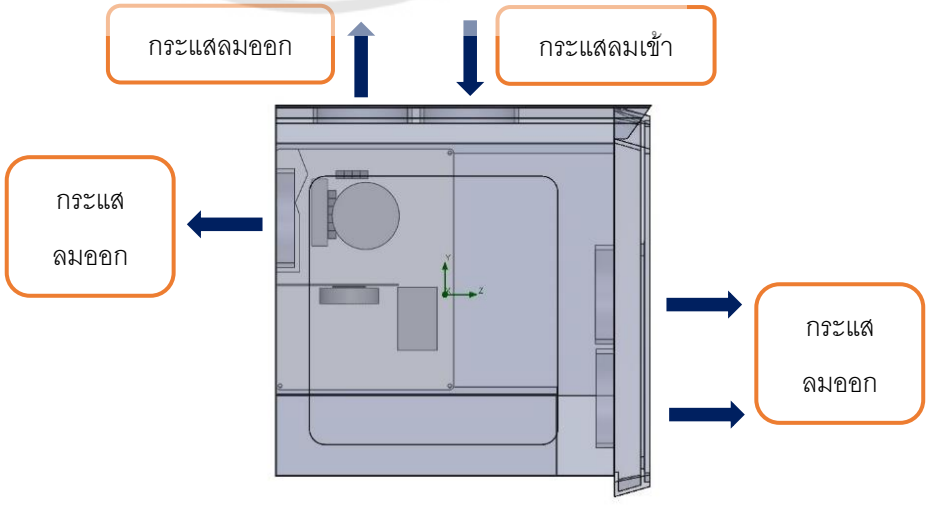
ตารางที่ 4.3 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 1	

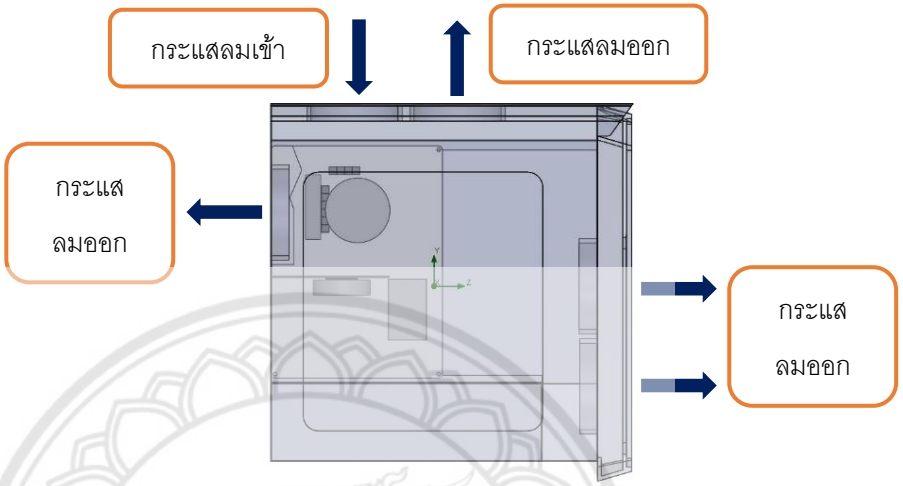
ตารางที่ 4.3 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 2	
รูปแบบที่ 3	
รูปแบบที่ 4	

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (ต่อ)

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 5	
รูปแบบที่ 6	
รูปแบบที่ 7	

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (ต่อ)

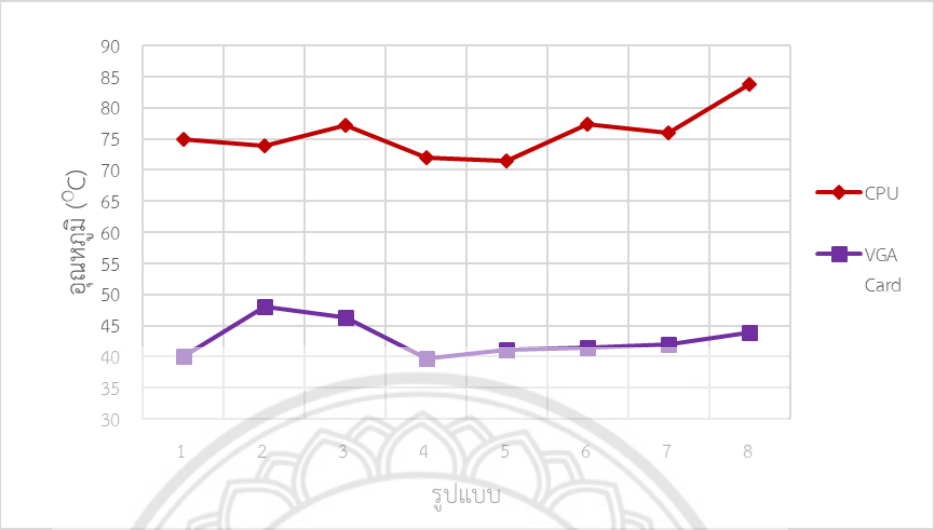
รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 8	

จากรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนทั้งหมด เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลของอุณหภูมิของจุดต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

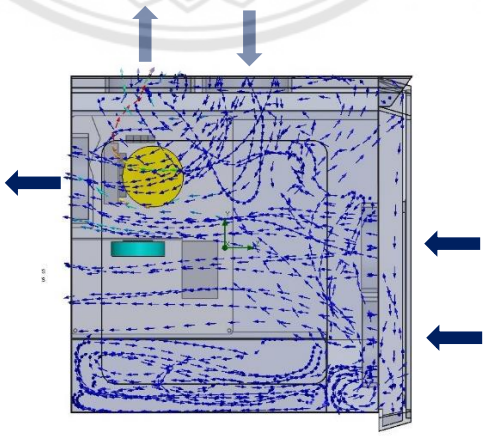
รูปแบบ	อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	
	CPU	VGA Card
1	75.0	40.1
2	73.8	48.0
3	77.2	46.4
4	71.9	39.7
5	71.4	41.1
6	77.3	41.4
7	75.9	42.0
8	83.8	43.8

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.4 สามารถนำมาแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของจุดต่างๆได้ ดังนี้

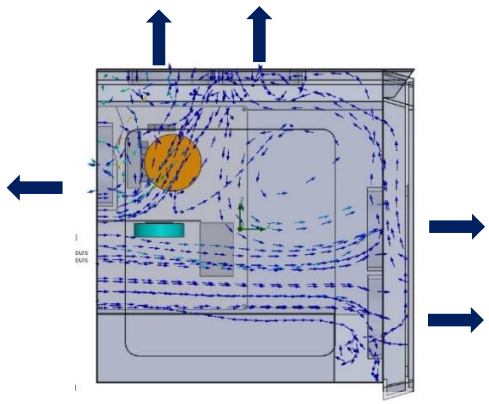


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าการติดตั้งพัดลม 5 ตัว ในรูปแบบที่ 5 โดยให้ติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทาง ส่วนด้านบนมีการติดตั้งโดยการสลับทิศทางลมดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะมีการระบายความร้อนของ CPU ได้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 71.4 °C และในรูปแบบที่ 4 ที่ติดตั้งพัดลมทุกตัวให้ดูดเอาอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ จะมีการระบายความร้อนของ VGA Card ได้ดีที่สุด ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 39.7 °C



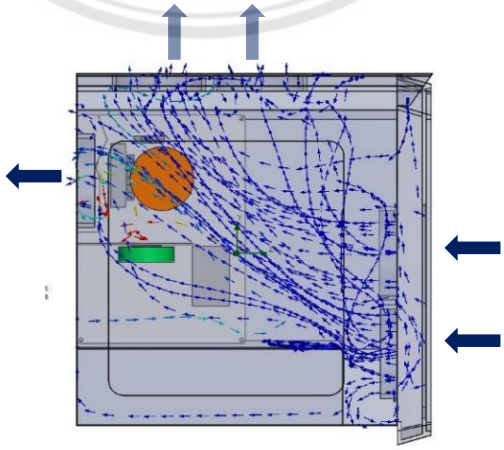
รูปที่ 4.8 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 5



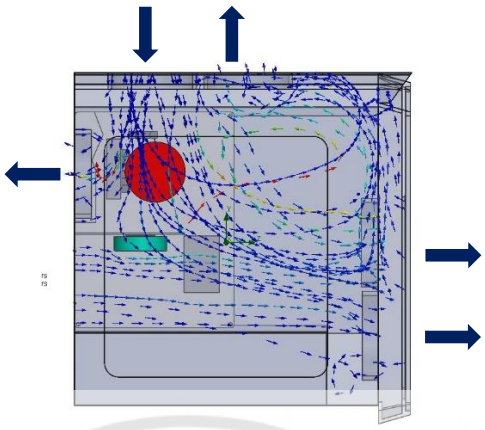
รูปที่ 4.9 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 4

เมื่อพิจารณารูปแบบการติดตั้ง 1-4 จะพบว่าในกรณีการติดตั้งพัดลมให้ดูดอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์บริเวณด้านบนของ CPU จะมีผลตรงกันข้ามกับในกรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัว กล่าวคือ การติดตั้งโดยการดูดอากาศร้อนออกจากตัวเคสจะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่าการดูดอากาศเย็นเข้าตัวเคส ซึ่งจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิกรณีการติดตั้งรูปแบบที่ 1 เปรียบเทียบกับ 2 หรือ 3 เปรียบเทียบ 4

สำหรับการติดตั้งพัดลม 5 ตัว รูปแบบที่ควรหลีกเลี่ยงในการติดตั้ง คือ รูปแบบที่ 3 6 7 และ 8 ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่มีปัญหาลักษณะเดียวกันกับ กรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัว คือ อากาศเย็นในรูปแบบเหล่านี้จะถูกพัดลมบังคับทิศทางให้ลมส่วนใหญ่ไม่วิ่งผ่านบริเวณอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูง ดังนั้นจึงไม่สามารถระบายความร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ได้ดี



รูปที่ 4.10 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.11 การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบที่ 8

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลของการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการทดลองจริงและจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลม ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของ CPU และ VGA Card สามารถสรุปผลได้ตามขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

5.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการคำนวณหาค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่า Quadratic Sum ที่มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจากการคำนวณได้ค่า Root Mean Square Error ของ CPU เท่ากับ 0.76 และค่า Mean Bias Difference ของ CPU เท่ากับ 0.70 ซึ่งค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference มีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

5.1.2 การวิเคราะห์การระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์กรณีติดตั้งพัดลม 3 ตัว

การเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลม กรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัว ที่ส่งผลให้อุณหภูมิของ CPU และ VGA Card ลดลงได้มากที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 โดยมีการติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทางและมีพัดลมดูดเอาอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ บริเวณด้านหลัง CPU ซึ่งจะมีอุณหภูมิของ CPU และ VGA Card อยู่ที่ 74.6 $^{\circ}$C และ 40.1 $^{\circ}$C ตามลำดับ และรูปแบบที่ควรหลีกเลี่ยงในการติดตั้ง คือ รูปแบบที่ 9 และ 17 เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ทิศทางการไหลของอากาศเย็นถูกพัดลมบังคับให้ไหลออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์โดยยังไม่ได้สัมผัสกับบริเวณที่มีความร้อนสูง จึงส่งผลให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆ ยังคงมีความร้อนที่สูงอยู่

5.1.3 การวิเคราะห์การระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์กรณีติดตั้งพัดลม 5 ตัว

การเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลม กรณีการติดตั้งพัดลม 5 ตัว ที่ส่งผลให้อุณหภูมิของ CPU ลดลงได้มากที่สุด คือ รูปแบบที่ 5 โดยให้ติดตั้งพัดลมนำอากาศเย็นเข้าจากทางด้านหน้าของตัวเคสคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 ช่องทาง ด้านบนมีการติดตั้งพัดลมสลับให้ทิศทางโดยการดูดเข้าด้านหน้าและออกด้านหลัง สามารถทำให้อุณหภูมิของ CPU อยู่ที่ 71.4 °C และในส่วนของรูปแบบที่ทำให้อุณหภูมิของ VGA Card ลดลงได้มากที่สุด คือ รูปแบบที่ 4 ที่ติดตั้งพัดลมทุกตัวให้ดูดเอาอากาศร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ สามารถทำให้อุณหภูมิของ VGA Card อยู่ที่ 39.7 °C และรูปแบบที่ควรหลีกเลี่ยงในการติดตั้ง คือ รูปแบบที่ 3 6 7 และ 8 ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่มีปัญหาลักษณะเดียวกันกับ กรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัว คือ อากาศเย็นในรูปแบบเหล่านี้จะถูกพัดลมบังคับทิศทางให้ลมส่วนใหญ่ไม่วิ่งผ่านบริเวณอุปกรณ์ที่มีความร้อนสูง ดังนั้นจึงไม่สามารถระบายความร้อนออกจากตัวเคสคอมพิวเตอร์ได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า-ออกของกระแสลม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทางคณะผู้จัดทำจึงมีข้อเสนอแนะกับผู้สนใจในการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ศึกษาเกี่ยวกับพัดลมที่สามารถเปลี่ยนความเร็วรอบของพัดลมได้

5.2.2 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ควรมีสมรรถนะสูงเพื่อความรวดเร็วและความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.3 ปรับปรุงรายละเอียดของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการเพิ่มอิทธิพลของพัดลมระบายความร้อนของ CPU และ VGA Card

เอกสารอ้างอิง

[1] นายธีรพล ชัยวิเศษ นายณัฐพล กันทำเมืองลี้. (2557). **การวิเคราะห์ผลกระทบแผ่นกั้นแบบเกลียวต่อการส่งผ่านความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.** มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

[2] ผศ. ทสพล เขตเจนการ (ผู้บรรยาย). (5 เมษายน 2563). Basic Error Analysis. **ความคลาดเคลื่อนสะสม.**

[3] ผศ. นพรัตน์ สีหะวงษ์ (ผู้บรรยาย). (11 กันยายน 2562). ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. **การเรียนเพิ่มเติมเรื่องระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.** (บทที่ 1-3).

[4] รศ.ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ (ผู้บรรยาย). **บทนำเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.** พิษณุโลก. มหาวิทยาลัยนเรศวร

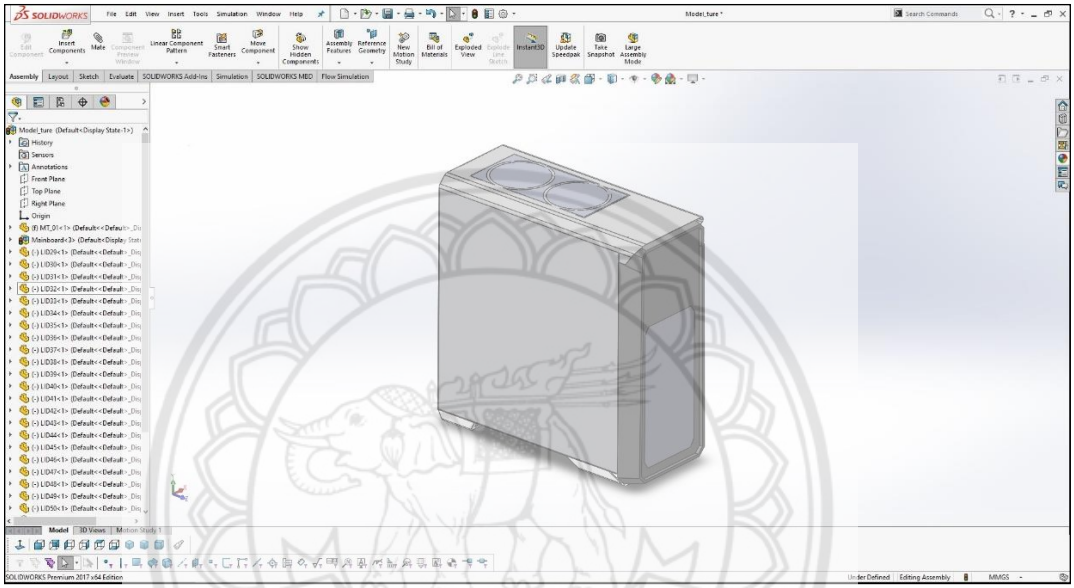
[5] นายพลวัฒน์ ไพรไพศาลกิจ. **Solidworks Flow Simulation.** สืบค้นเมื่อ 18 กันยายน 2562. จาก http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/

ภาคผนวก ก

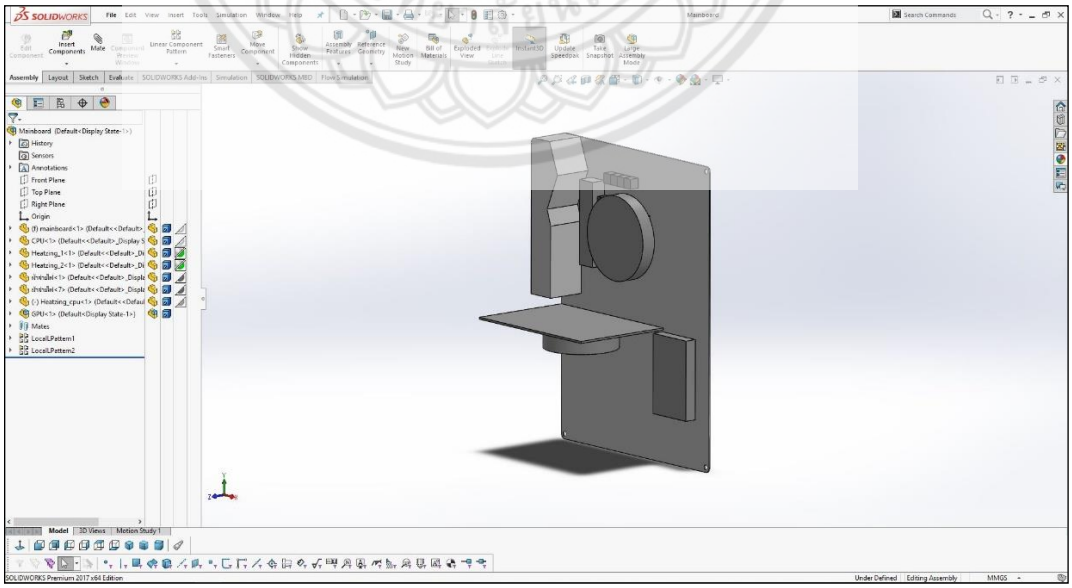
วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation

วิธีและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solidworks

แบบจำลองเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วนดังรูป



เคสคอมพิวเตอร์



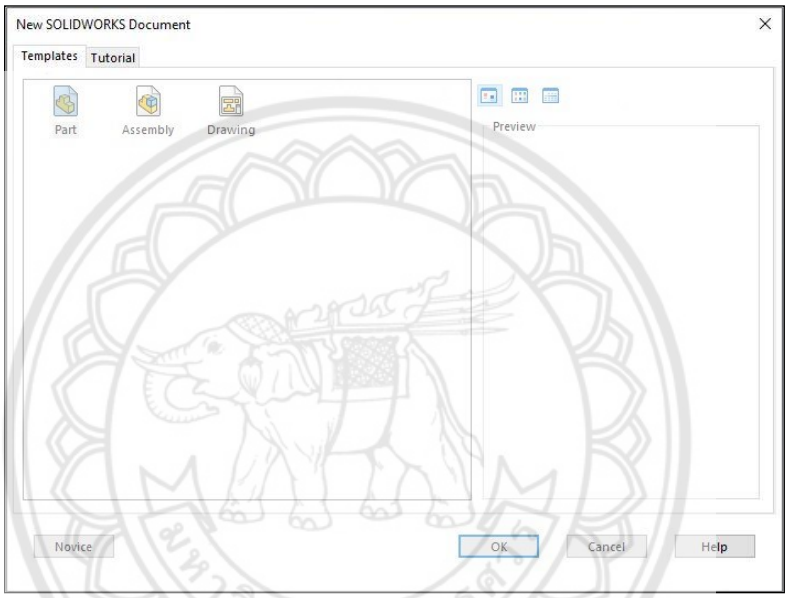
เมนบอร์ด

การสร้างเคสคอมพิวเตอร์

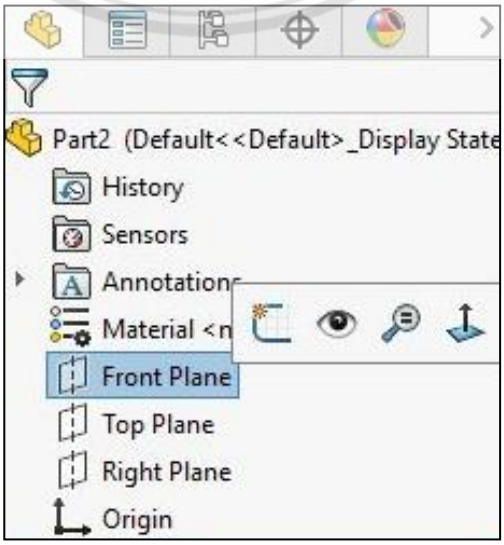
1. การสร้างตัวเคส

1.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

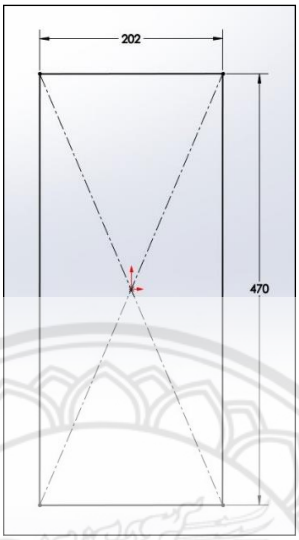
1.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D



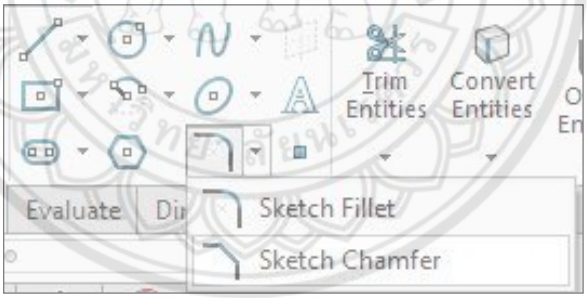
1.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



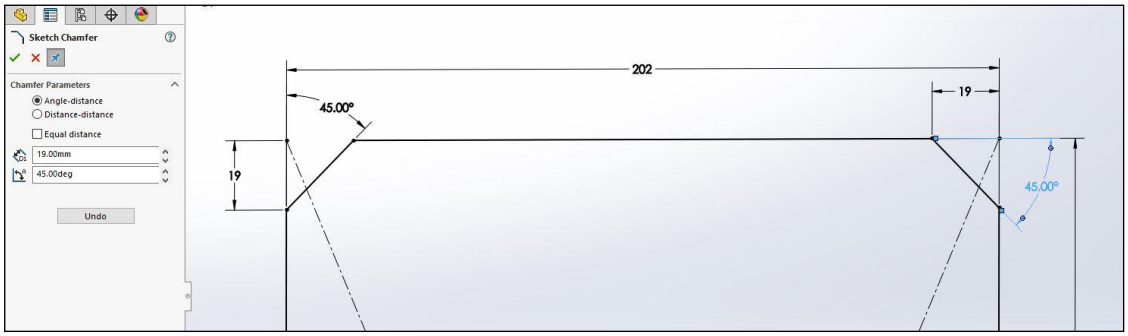
1.4 สร้างสี่เหลี่ยมขนาด 202 x 470 mm



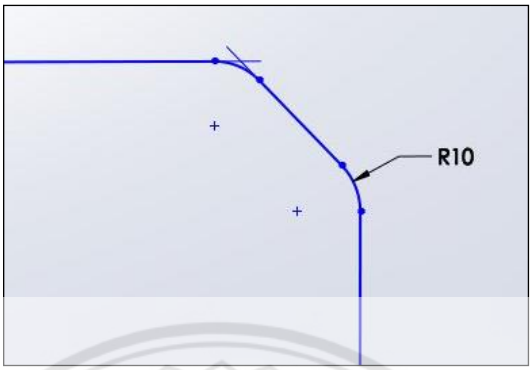
1.5 ตัดมุมของสี่เหลี่ยมด้วยคำสั่ง Chamfer จากเมนู



1.6 ตัดมุมของสี่เหลี่ยมขนาด 19 mm ที่ทำมุม 90°



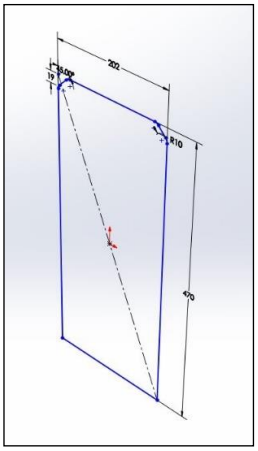
1.7 ลบมุมของจุดที่ทำ Chamfer ด้วยคำสั่ง Fillet จากเมนู

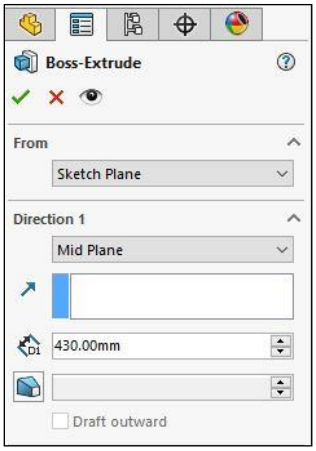


1.8 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

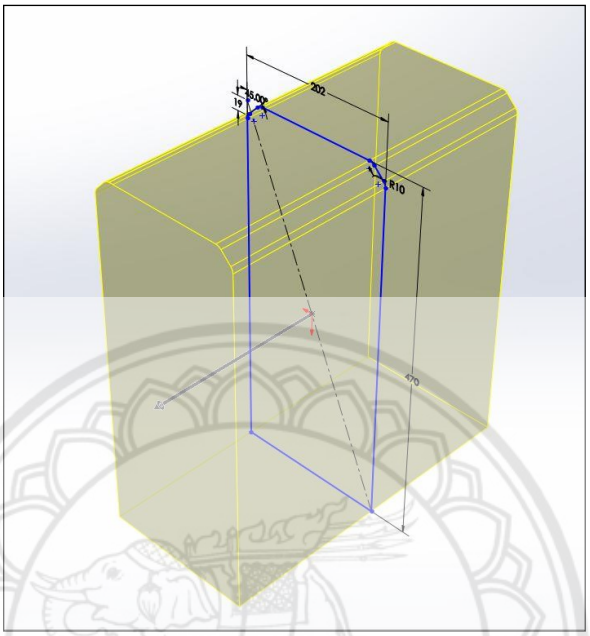
1.9 คลิก Features เลือก Extruded Boss/Base

1.9.1 กำหนด Depth (ความยาวของเคส) 430 mm

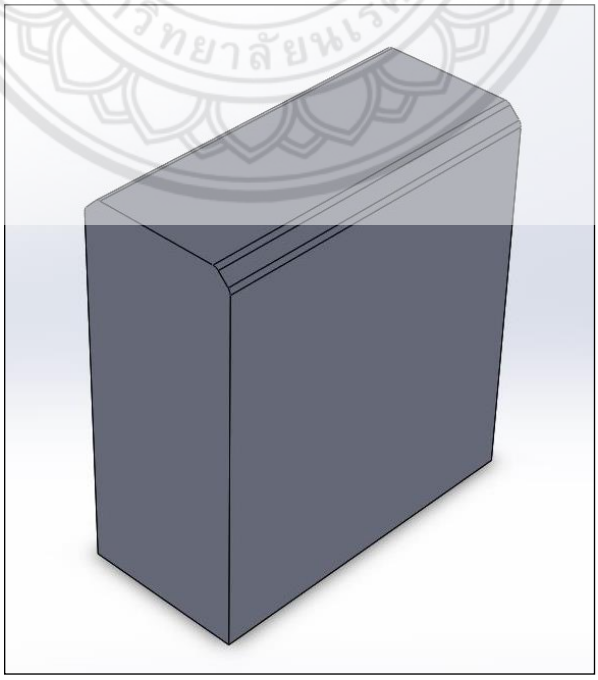




1.9.2 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane

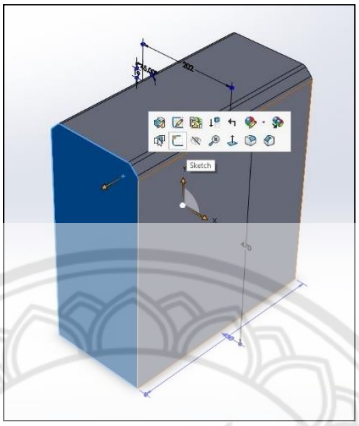


1.9.3 คลิก OK

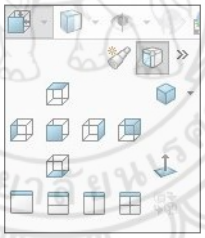


1.10 เลือกระนาบของกล่องที่ทำการ Extruded

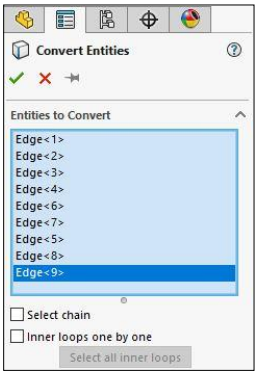
1.10.1 เลือก Insert Sketch จากเมนู



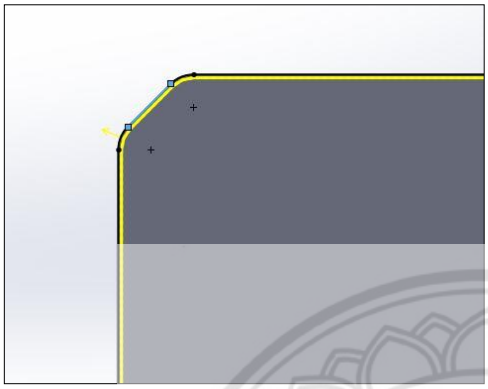
1.10.2 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

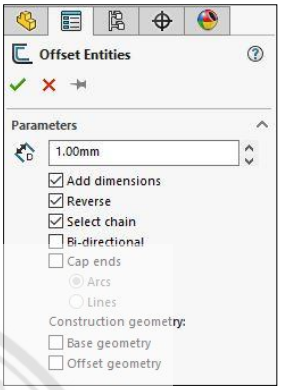


1.10.3 สร้างเส้นใหม่จากคำสั่ง Convert Entities เลือกเส้นที่ต้องการ จากนั้นกด OK



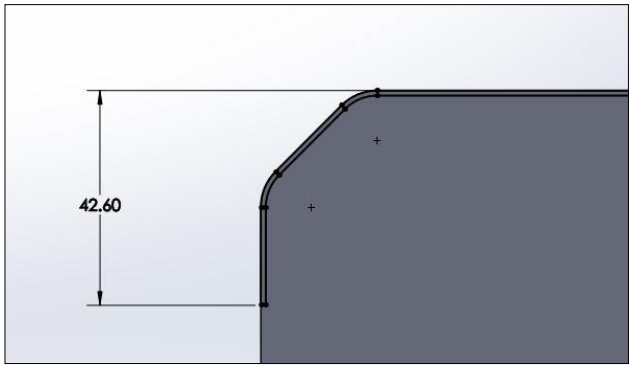
1.10.4 คัดลอกเส้นจากคำสั่ง Offset Entities เลือกเส้นที่ต้องการ และกำหนด Depth เป็น 1 mm จากนั้นคลิก OK





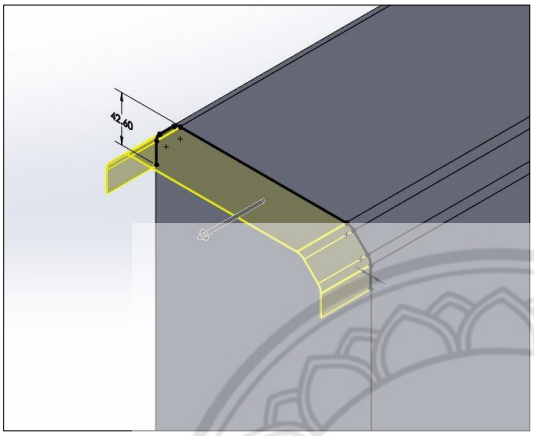
1.10.5 สร้างเส้นจากคำสั่ง Line และกำหนดระยะจากด้านบน 42.60 mm โดยคำสั่ง Smart Dimention

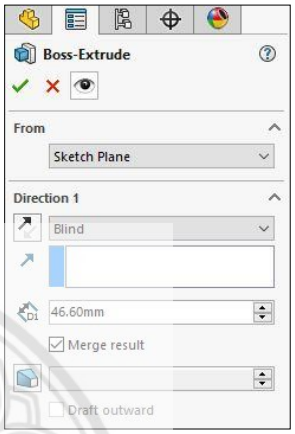
1.10.6 ลบเส้นที่ไม่ต้องการใช้ออก โดยคำสั่ง Trim Entities จากเมนู



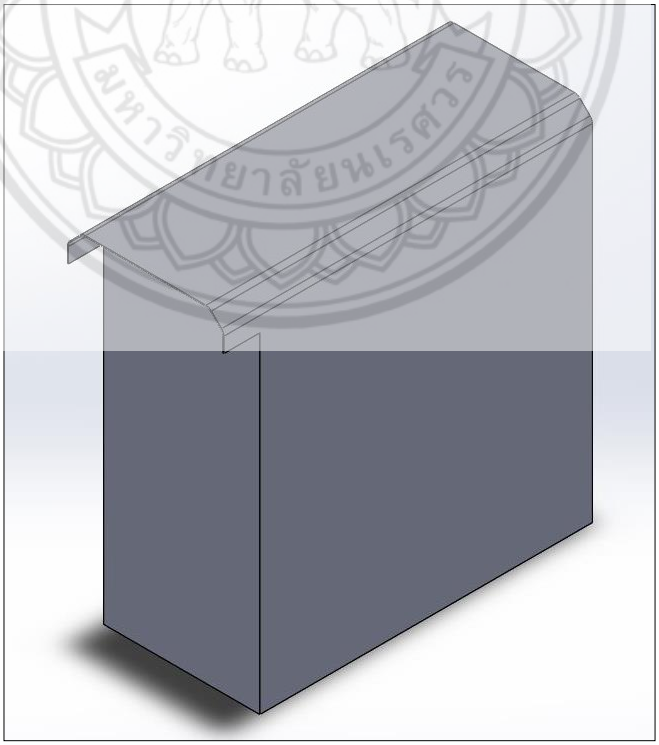
1.10.7 คลิก Features เลือก Extruded Boss/Base

1.10.8 กำหนด Depth (ความยาวของเคส) 46.60 mm



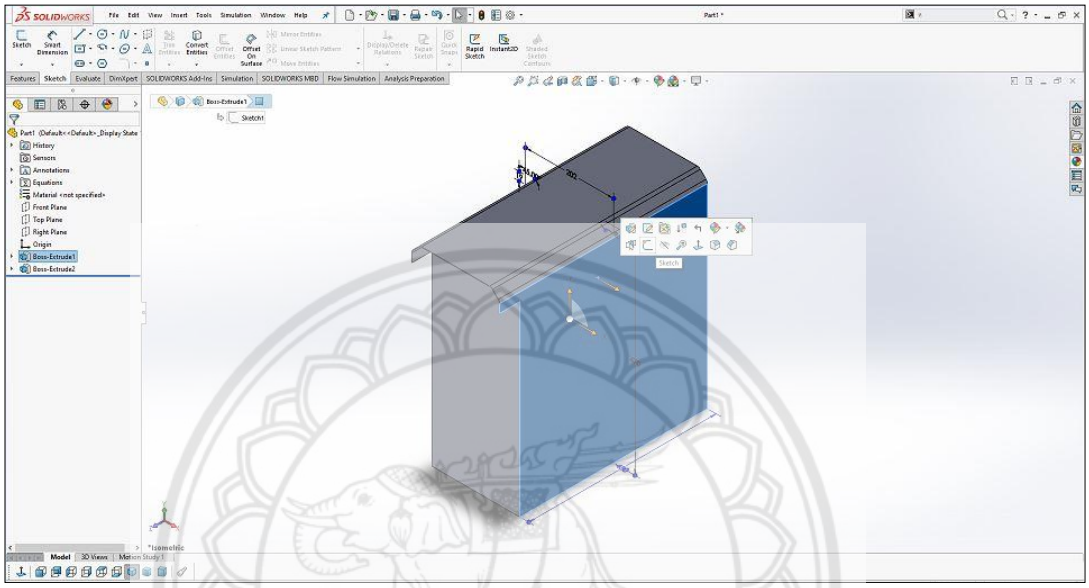


1.10.9 คลิก OK



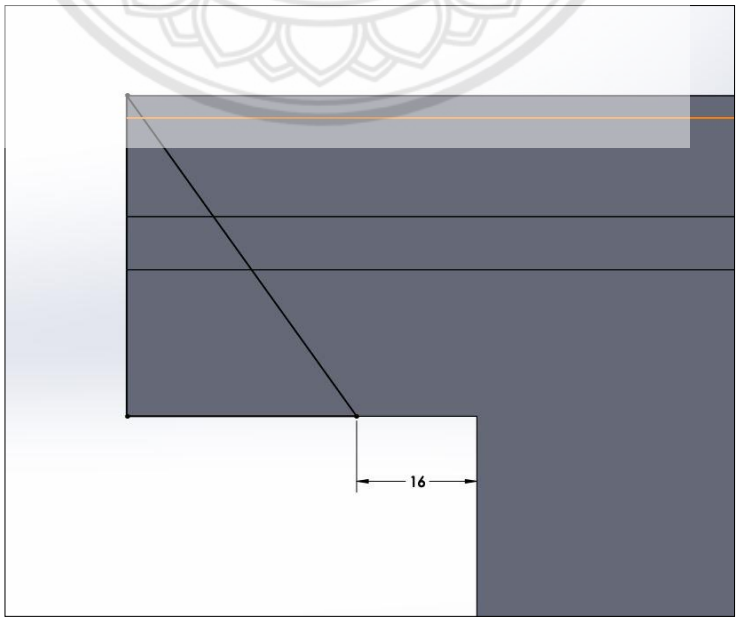
1.11 ตัดส่วนที่ไม่ได้ใช้

1.11.1 เลือกระนาบด้านข้างของเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



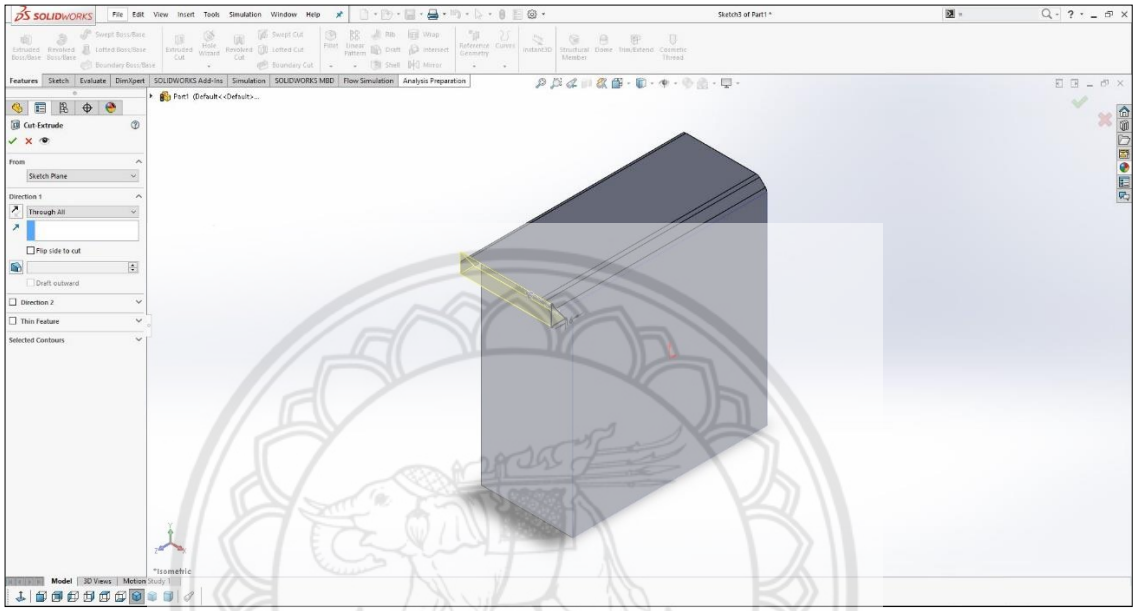
1.11.2 สร้างเส้นจากคำสั่ง Line และกำหนด Depth (ระยะจากด้านหน้า)

16 mm

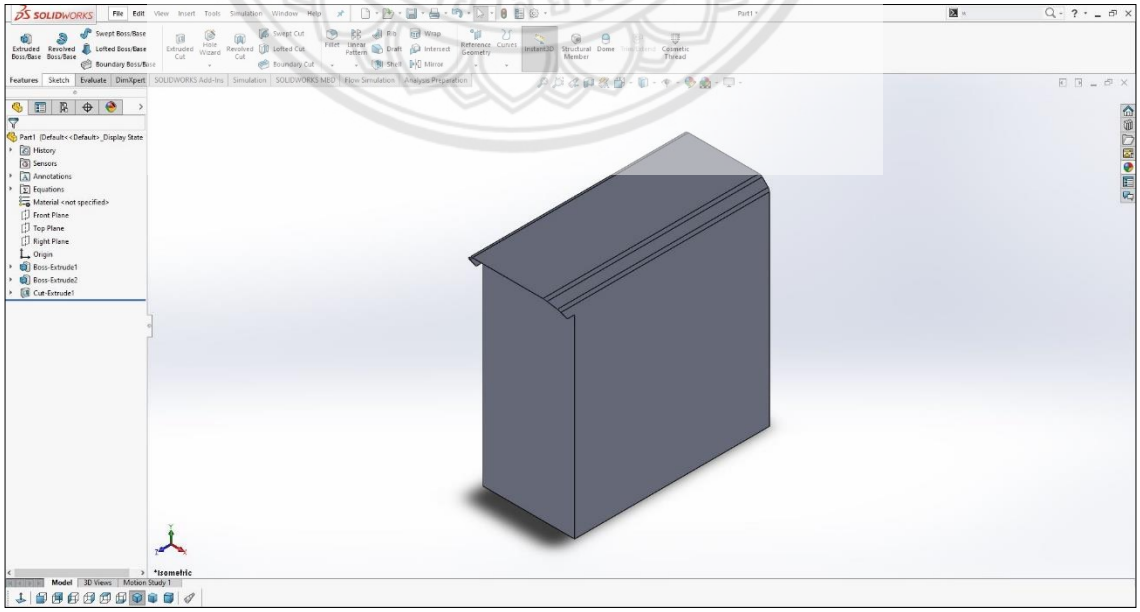


1.11.3 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

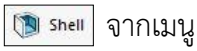
1.11.4 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Through All



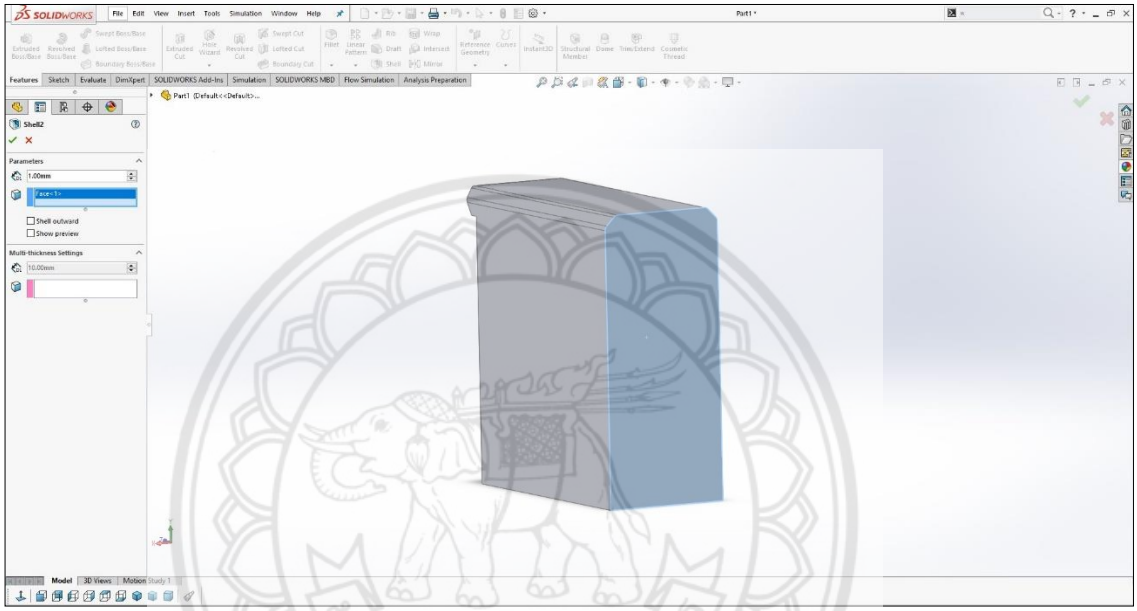
1.11.5 คลิก OK



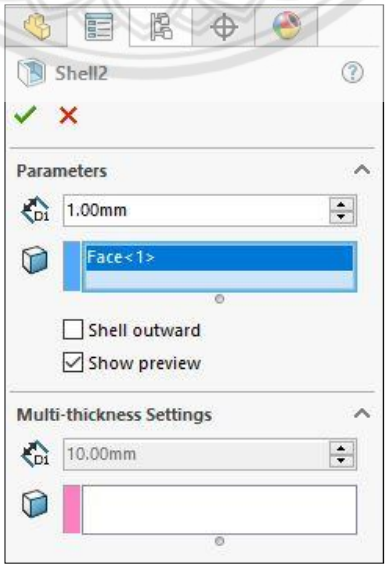
2. สร้างขอบ Shell

2.1 เลือกคำสั่ง Shell  จากเมนู

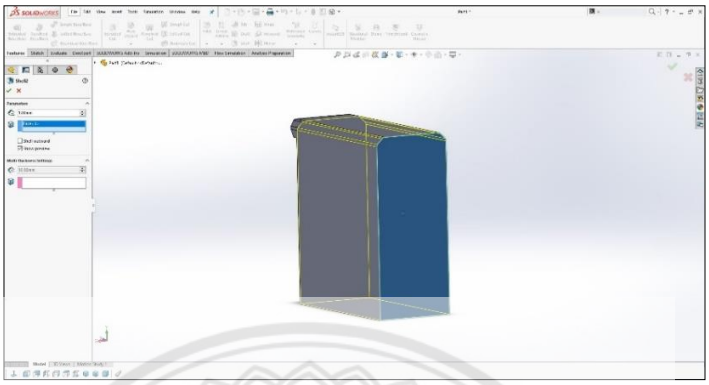
2.2 เลือกพื้นที่ที่ต้องการ Shell



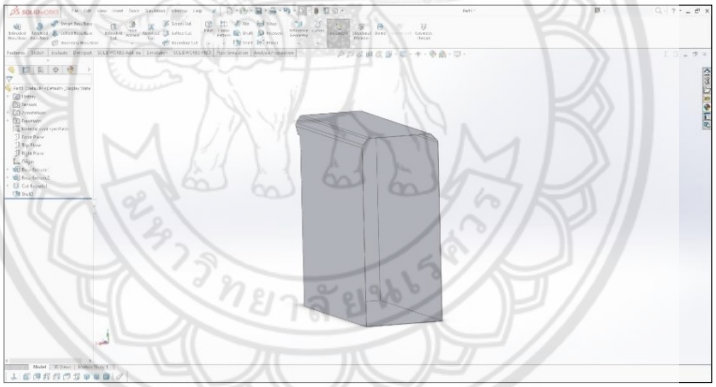
2.3 กำหนด Depth (ความหนาของขอบ Shell) 1 mm



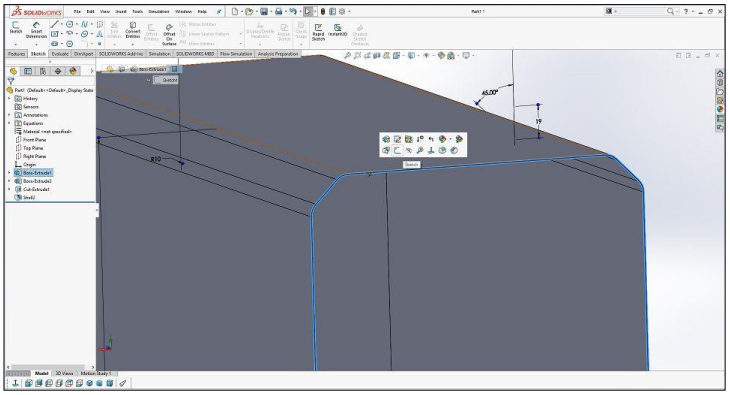
2.4 คลิกเลือก Show preview



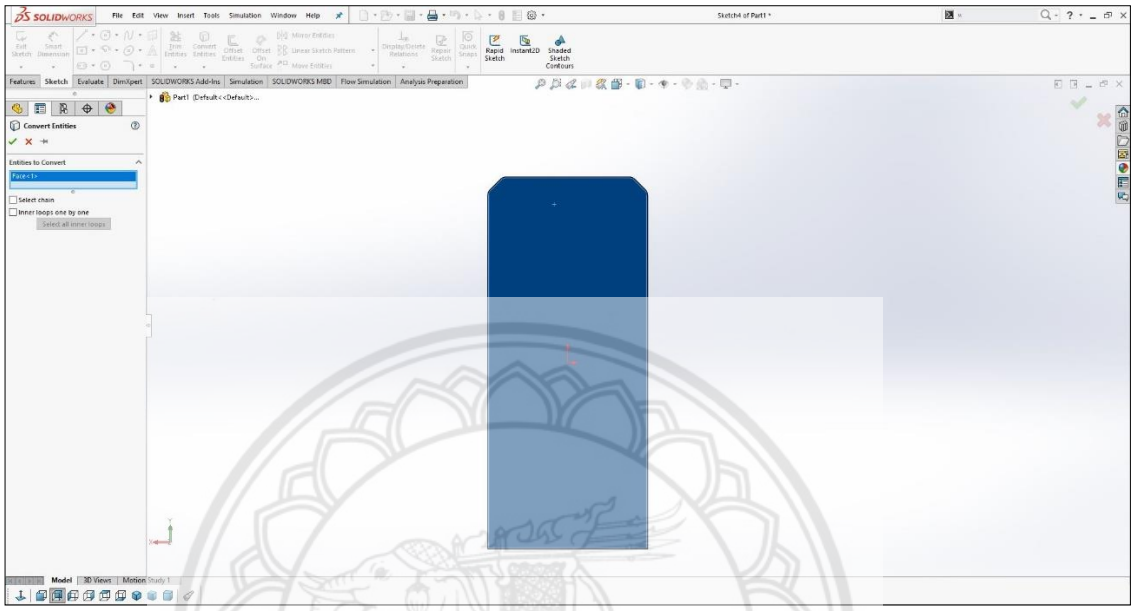
2.5 คลิก OK



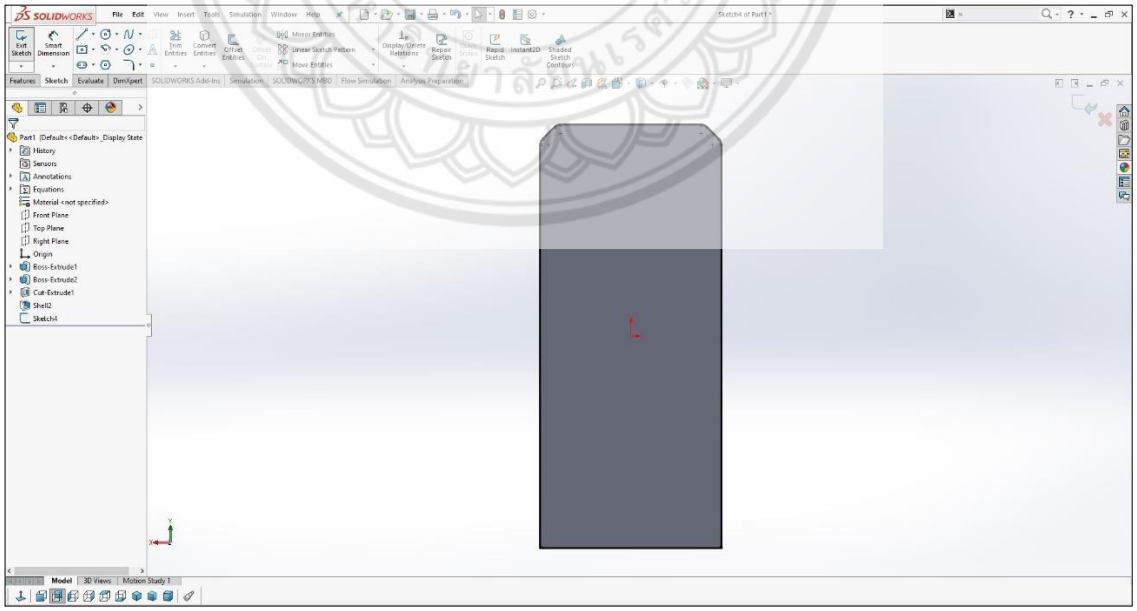
2.6 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



2.7 เลือกคำสั่ง Convert Entities จากนั้นเลือก Face เพื่อคัดลอกเส้น



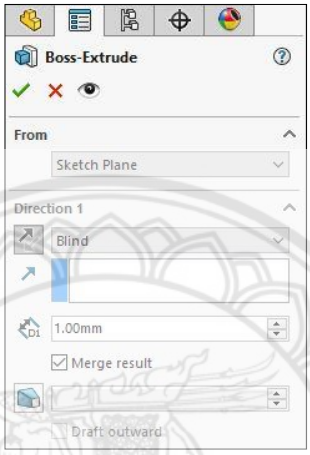
2.8 คลิก OK



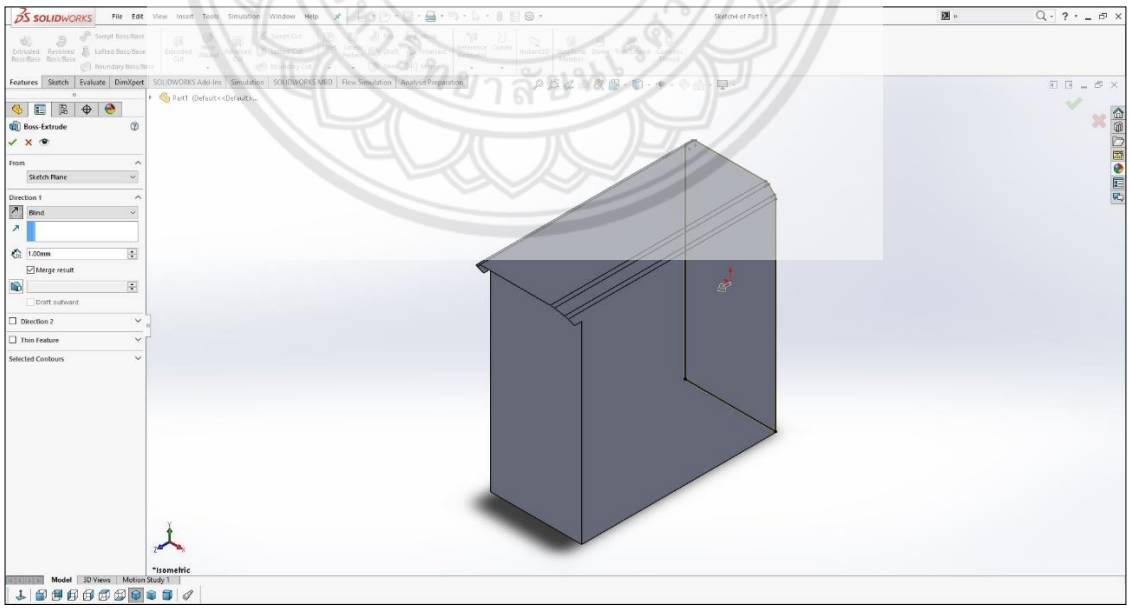
2.9 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.10 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

2.10.1 กำหนด Depth (ความหนาของเคส) 1 mm



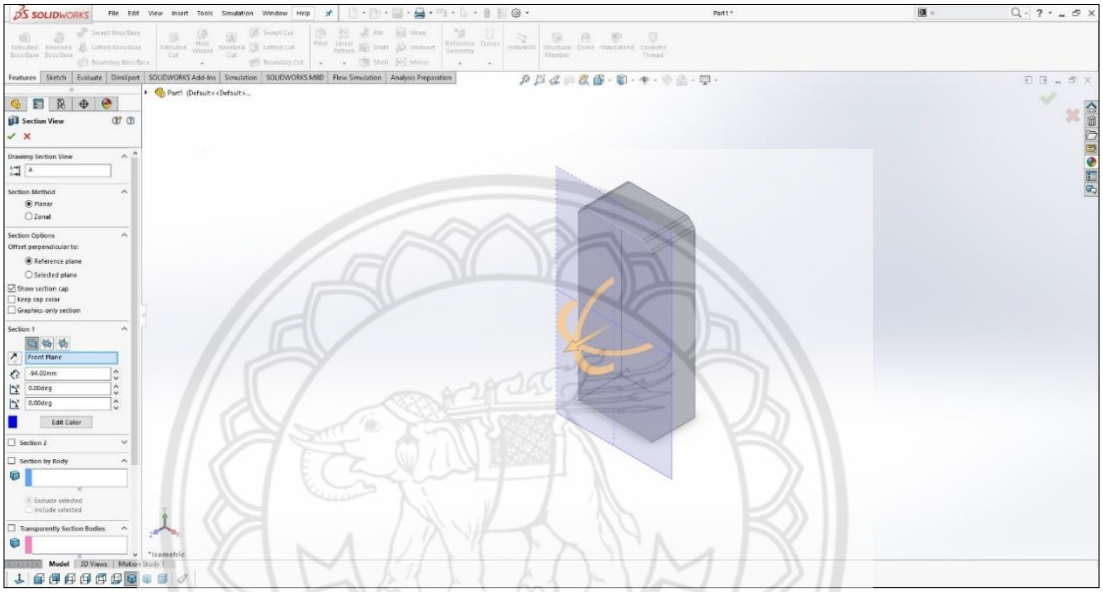
2.10.2 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



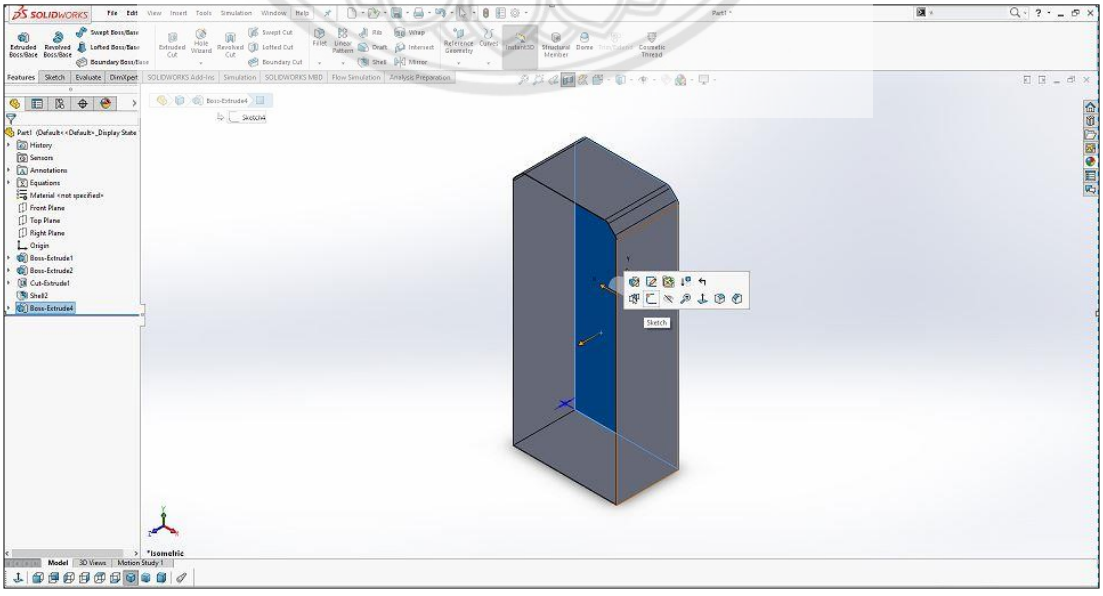
2.10.3 คลิก OK

3. การสร้างกล่อง Power supply

3.1 เลือกคำสั่ง Section View จากเมนู เพื่อสร้าง Sketch ภายในเคส



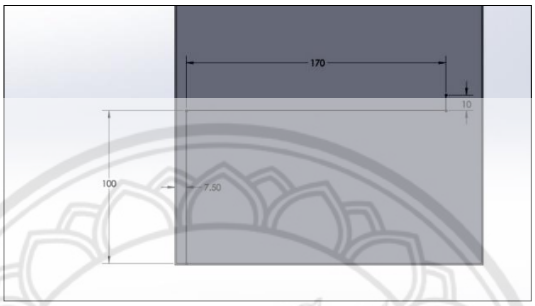
3.2 คลิกเลือกพื้นที่ภายในเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



3.3 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

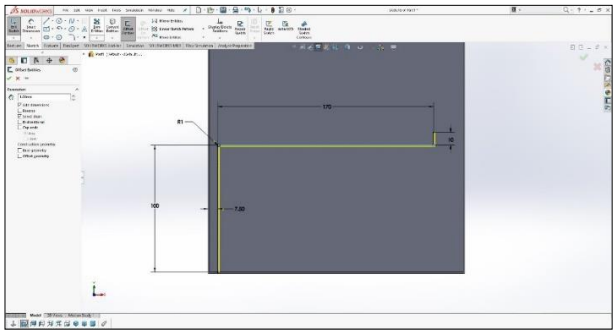
3.4 เลือกคำสั่ง Line เพื่อสร้างเส้น

3.5 เลือกคำสั่ง Smart Dimention กำหนดระยะของเส้นห่างจากด้านข้าง 7.50 mm ความสูงจากพื้น 100 mm ความยาว 170 mm ความสูงของเส้นเล็ก 10 mm



3.6 ลบมุมด้วยคำสั่ง Sketch Fillet รัศมี 1 mm

3.7 เลือกคำสั่ง Offset Entities กำหนด Depth (ความหนาของกล่อง Supply) 1 mm

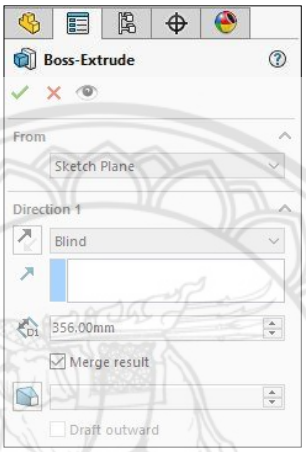


3.8 คลิก OK

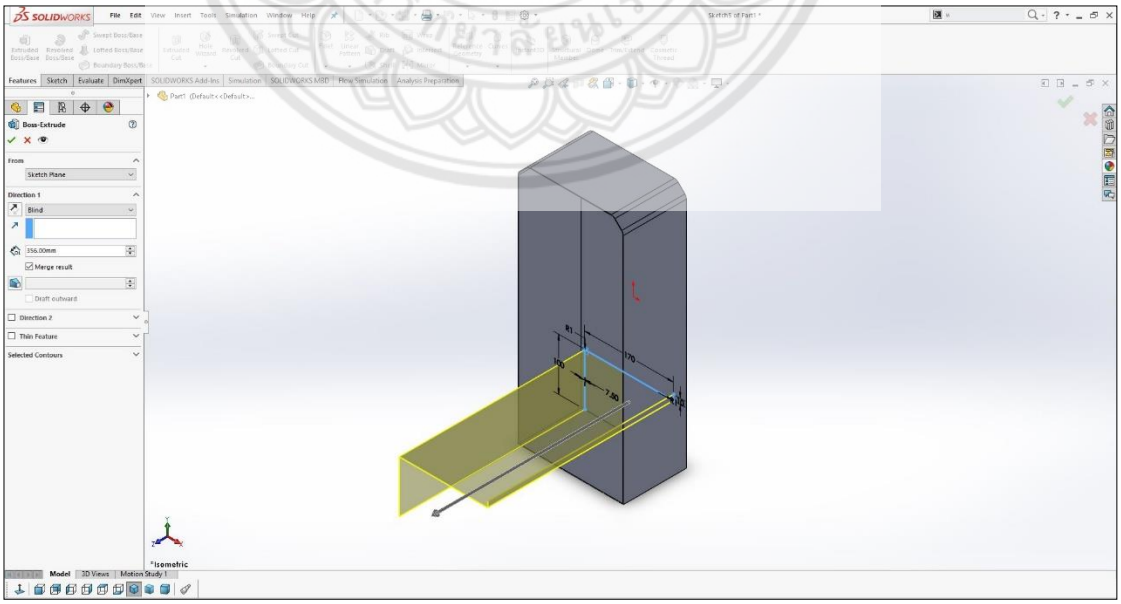
3.9 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

3.8.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.8.2 กำหนด Depth (ความยาวของกล่อง Supply) 356 mm

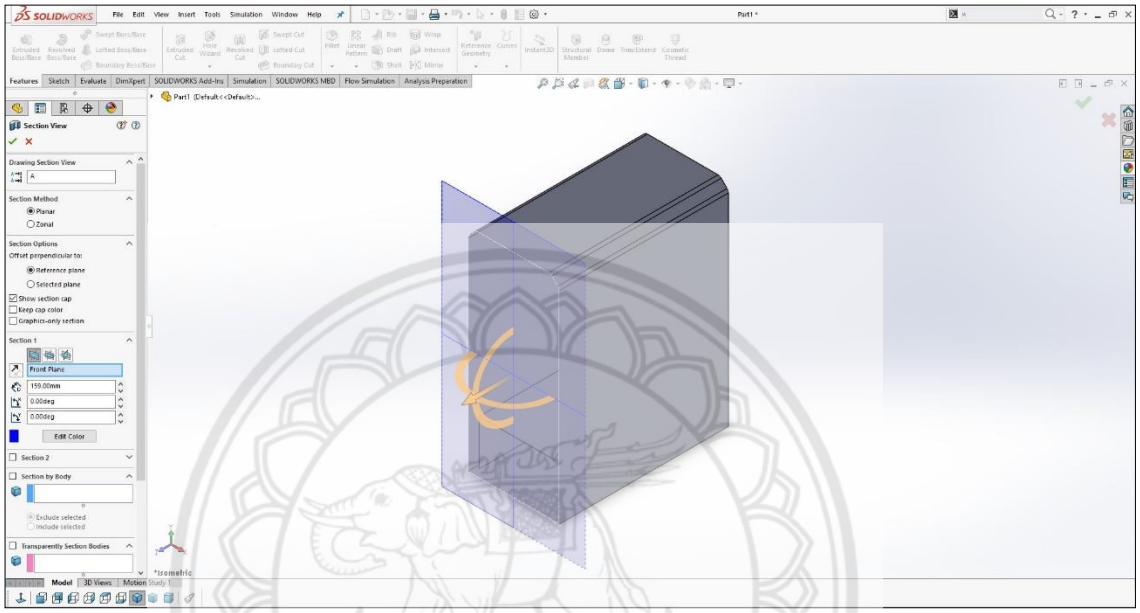


3.8.3 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



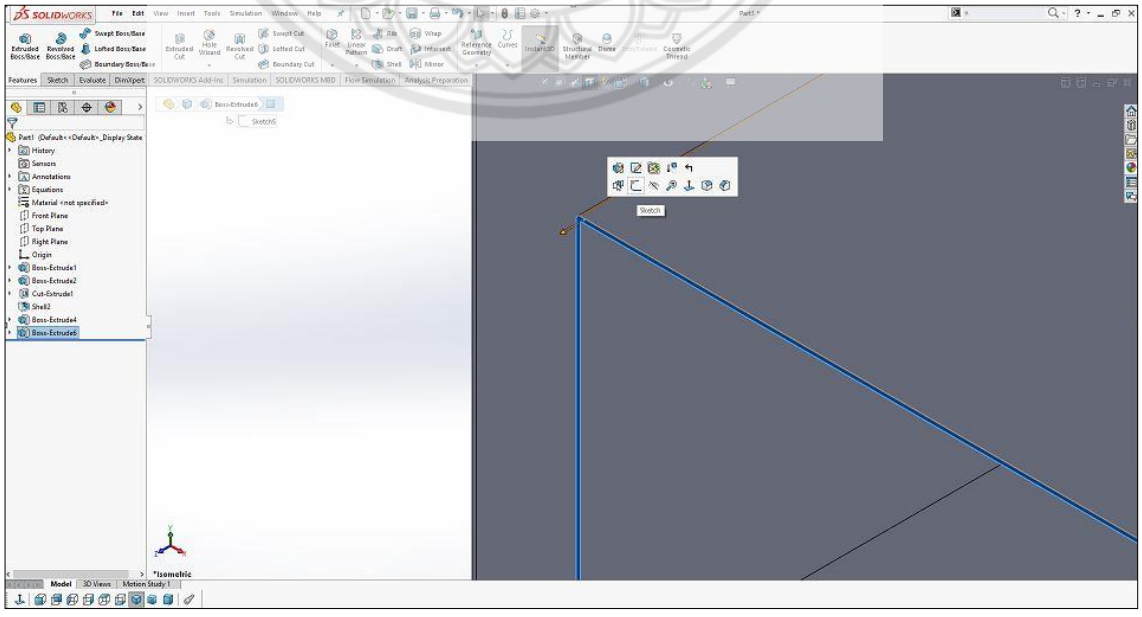
3.8.4 คลิก OK

3.8.5 ปรับความเหมาะสมของมุมมอง Section View



3.8.6 คลิก OK

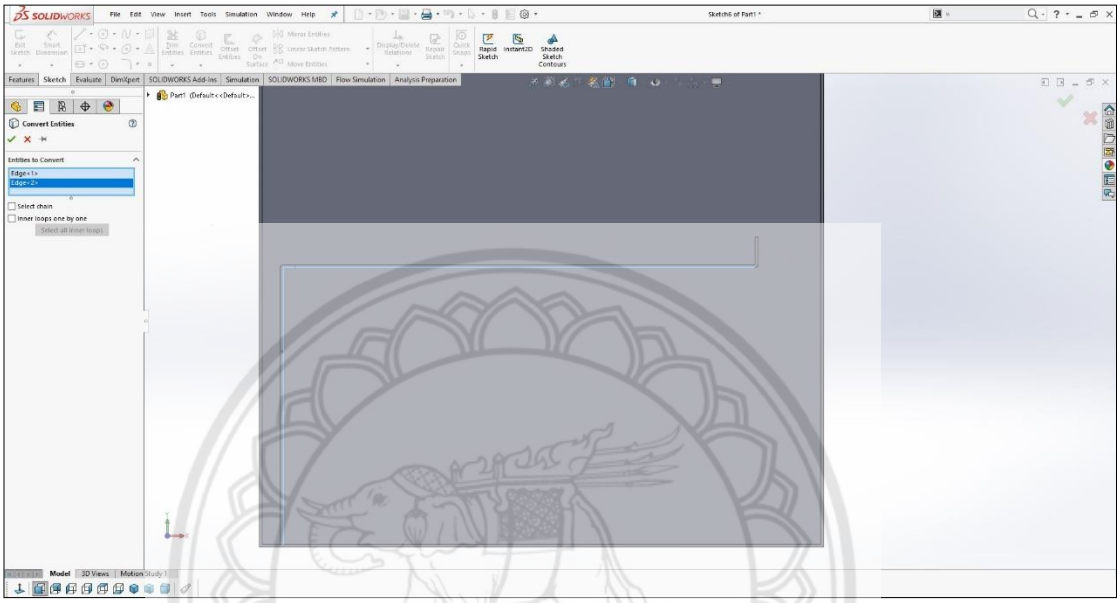
3.8.7 เลือกพื้นที่ด้านหน้ากล่อง Supply แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



3.8.8 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

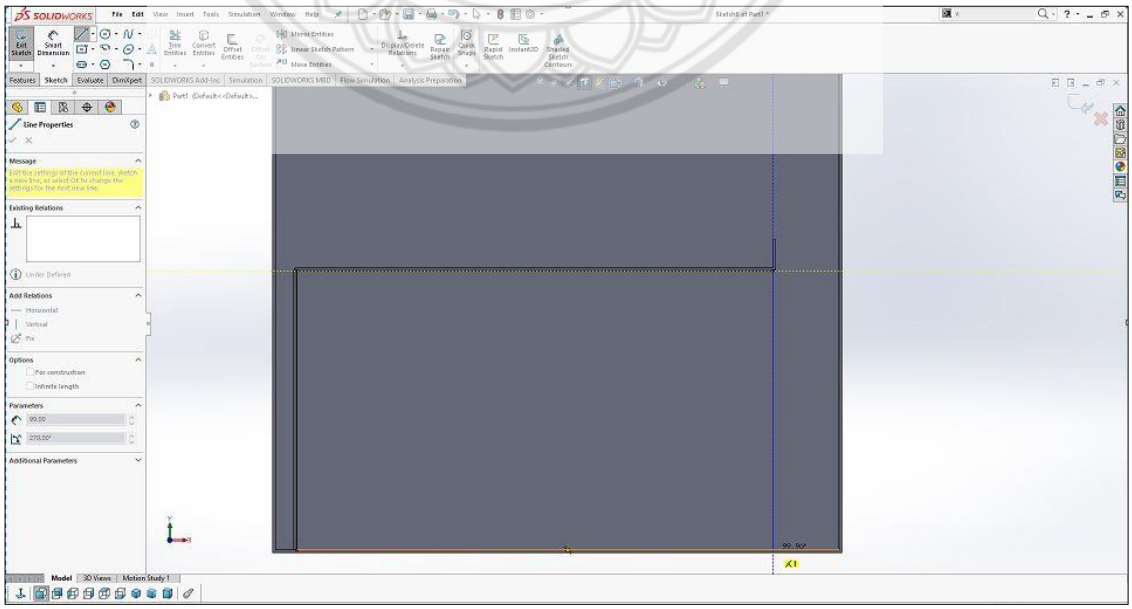
3.8.9 เลือกคำสั่ง Covert Entities

จากเมนู



3.8.10 คลิก OK

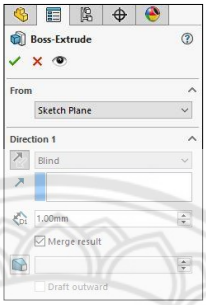
3.8.11 เลือกคำสั่ง Line จากเมนู



3.8.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

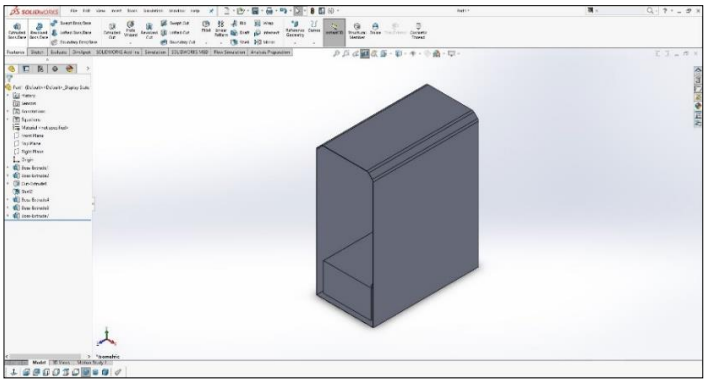
3.8.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

3.8.14 กำหนด Depth (ความหนาของกล่อง Supply) 1 mm



3.8.15 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind

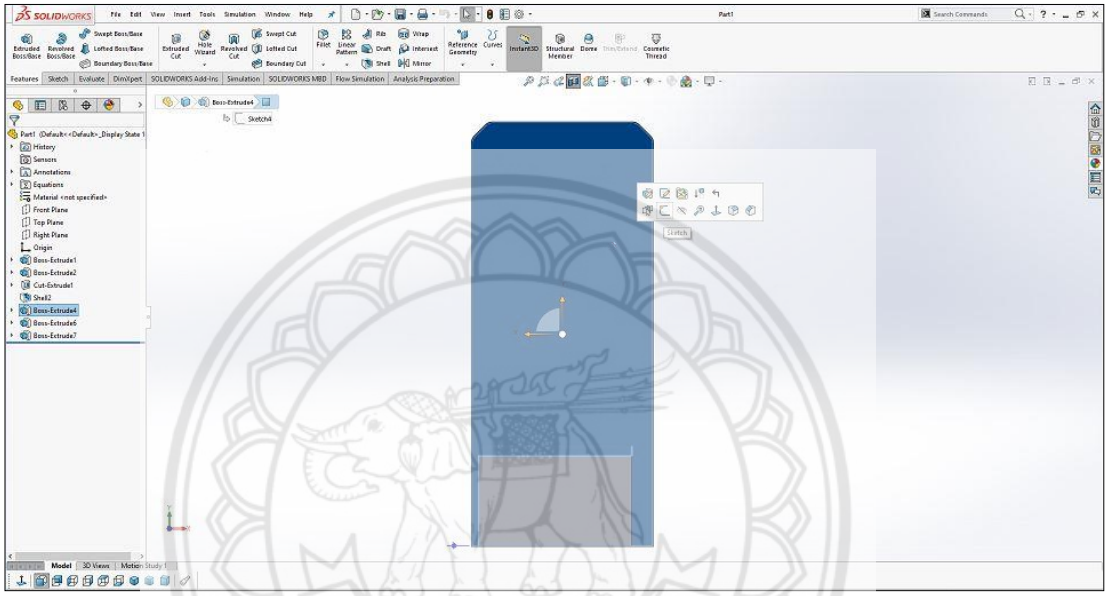
3.8.16 คลิก OK



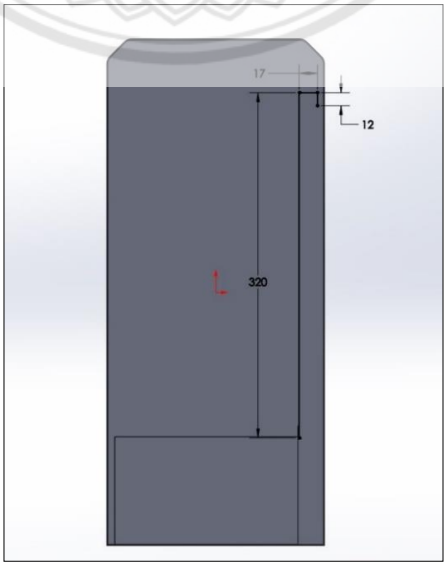
4. การสร้างแผ่นยึดเมนบอร์ด

4.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

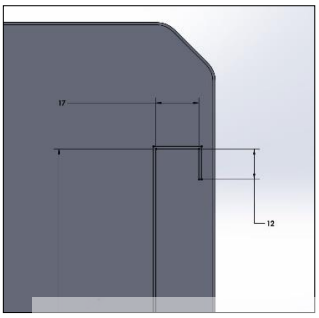
4.2 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

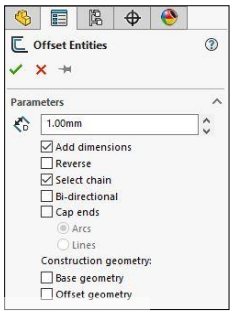


4.3 เลือกคำสั่ง Line เพื่อสร้างเส้นที่มีความสูงของแผ่น 320 mm ความกว้าง 17 mm และความยาวเส้นที่สั้น 12 mm



4.4 เลือกคำสั่ง Offset Entities และกำหนดความหนาของแผ่น 1 mm

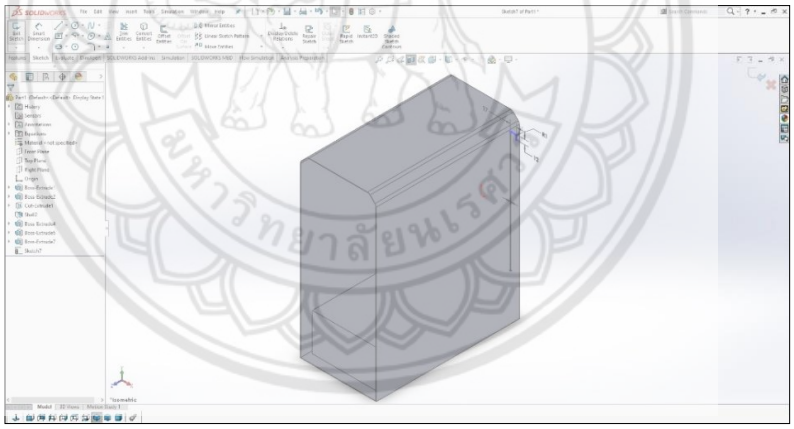




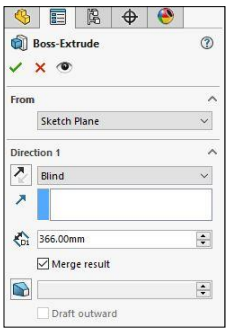
4.5 คลิก OK

4.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

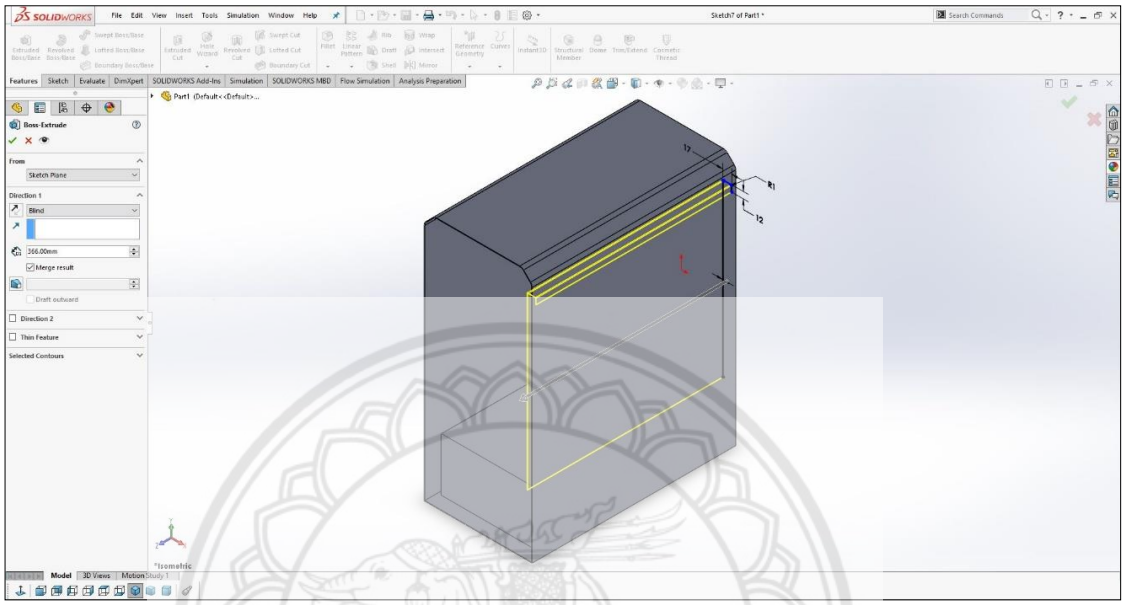
4.6.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric



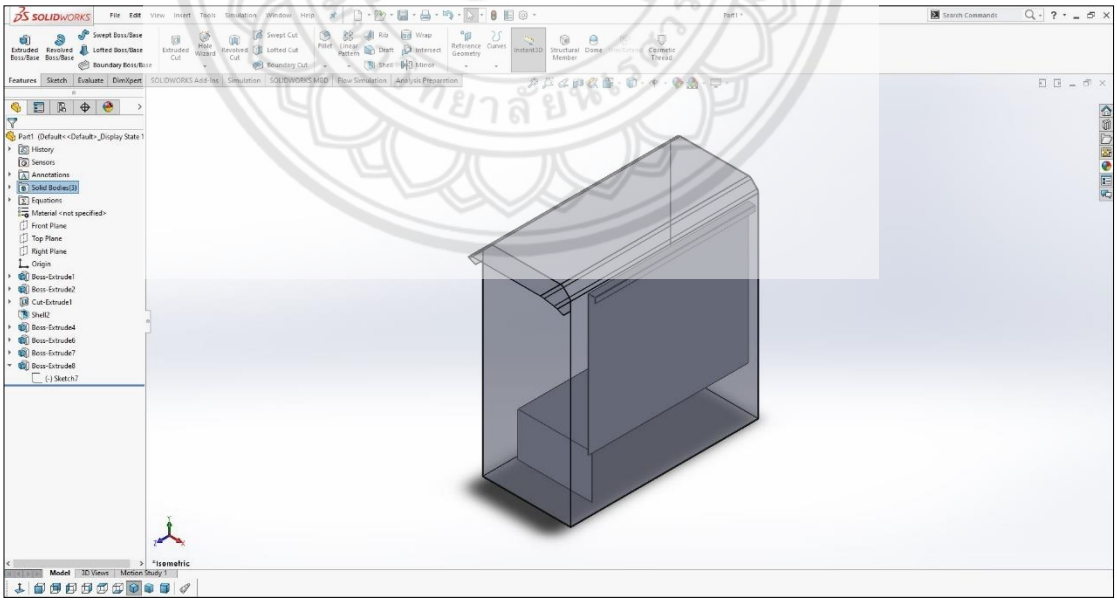
4.6.2 กำหนด Depth (ความกว้างของแผ่นยึดเมนบอร์ด) 366 mm



4.6.3 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



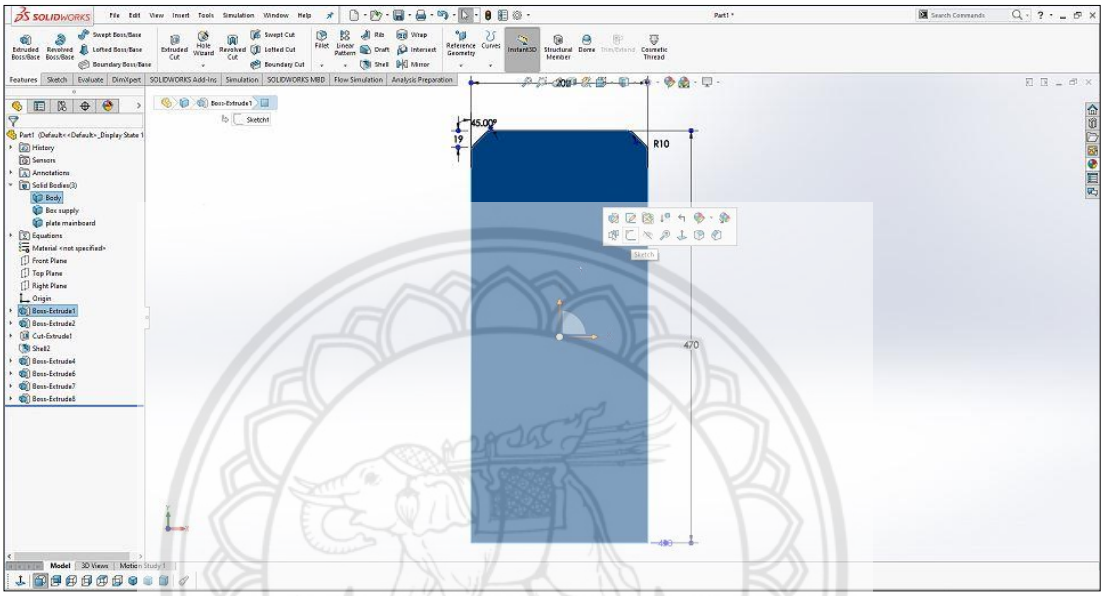
4.6.4 คลิก OK



5. การสร้างแผงหน้าเคสคอมพิวเตอร์

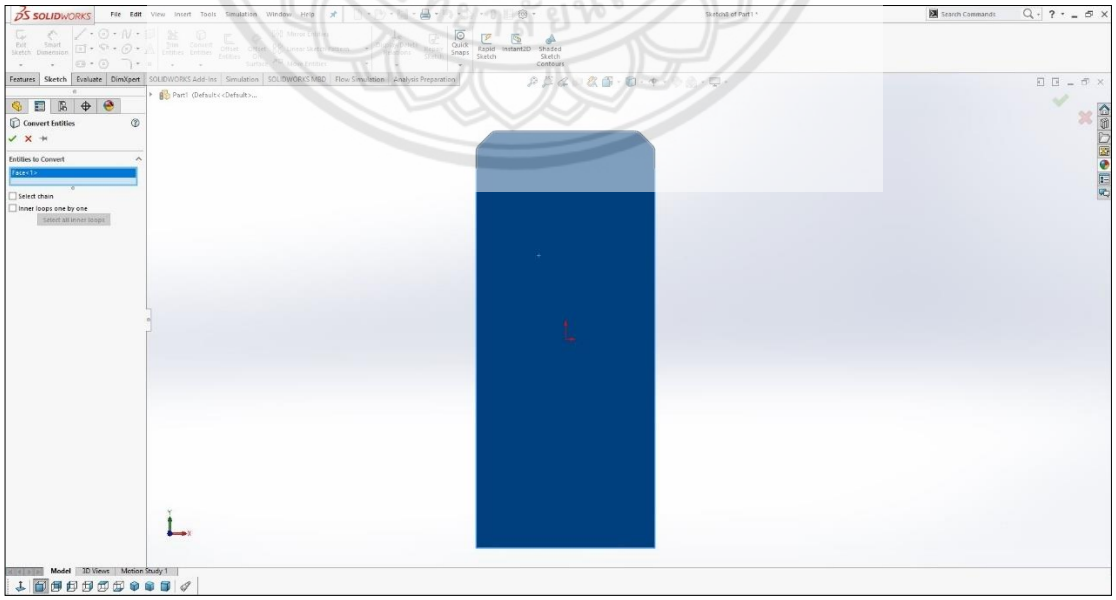
5.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

5.2 เลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



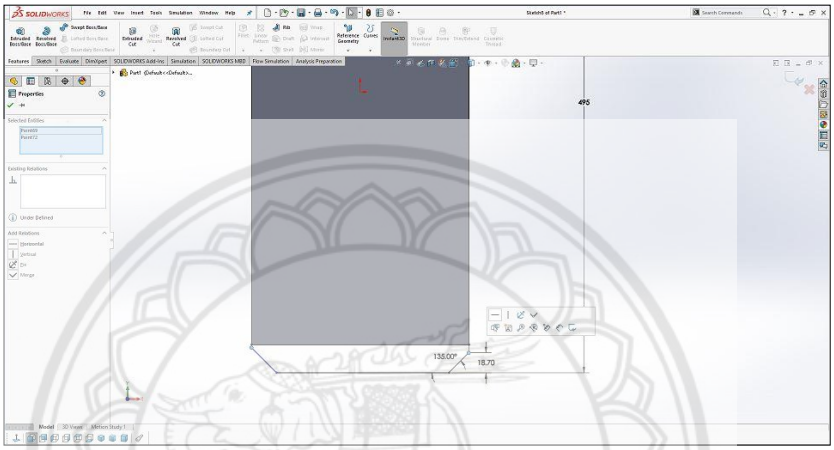
5.3 เลือกคำสั่ง Convert Entities

จากเมนู และเลือกทั้งพื้นที่



5.4 คลิก OK

5.5 เลือกคำสั่ง Line เพื่อสร้างเส้นเพิ่มเติม โดยกำหนดให้เส้นล่างมีระยะห่างจากเส้นด้านบนของเคส 495 mm และคลิกจุด 2 จุด และเลือกคำสั่ง Make Horizontal จากเมนู เพื่อให้จุด 2 จุดเท่ากัน

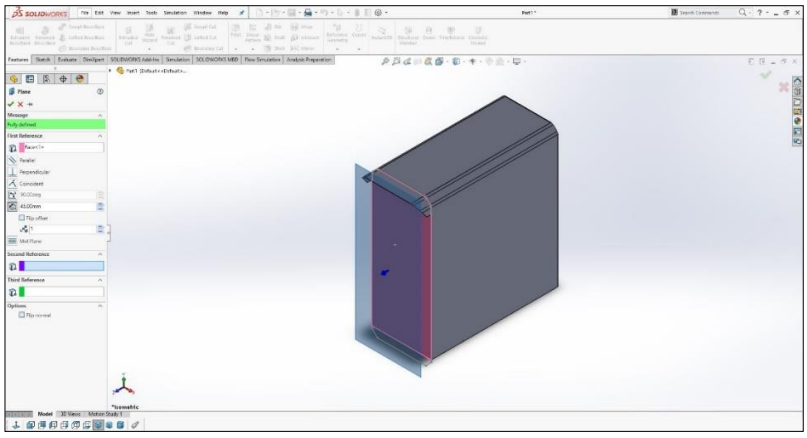


5.6 คลิกเลือกคำสั่ง Exit Sketch

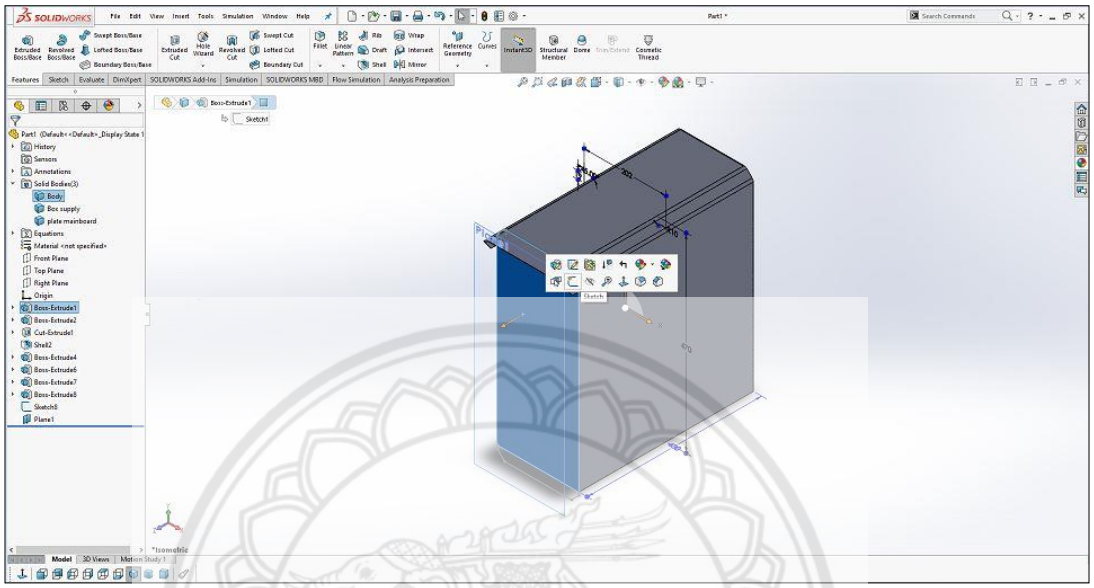
5.7 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

5.8 คลิก Features และคลิกคำสั่ง Reference Geometry แล้วเลือกคำสั่ง Plane

5.9 คลิกเลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส และกำหนด Depth (ความห่างของ Plane กับด้านหน้าเคส) 45 mm



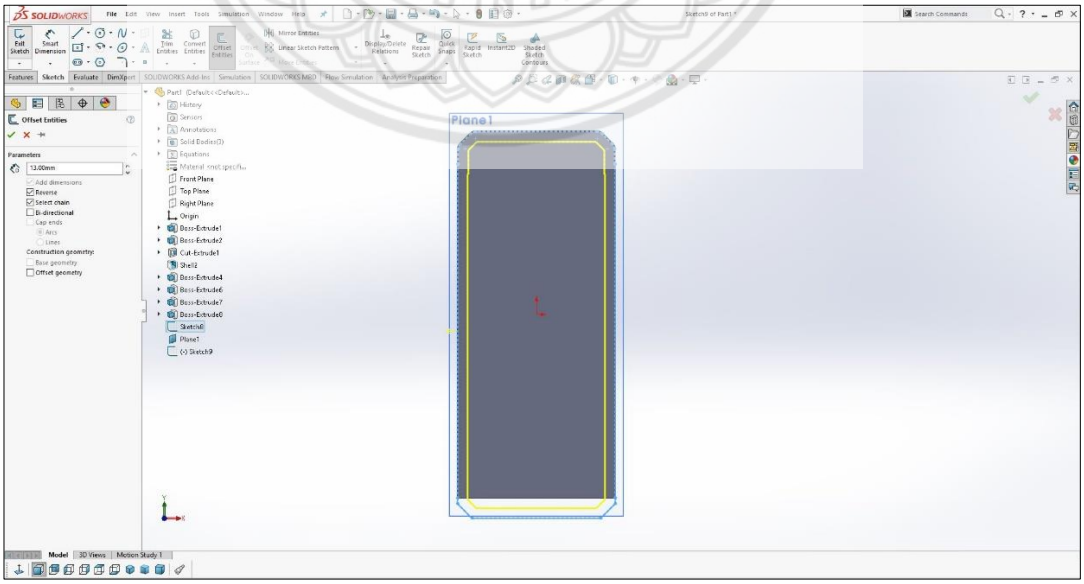
5.10 คลิกที่ Plane ที่พึ่งสร้าง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



5.11 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

5.12 เลือกคำสั่ง Offset Entities

แล้วคลิกเลือก Sketch ที่ผ่านมา และกำหนด Depth (ความหนาของการ Offset) 13 mm



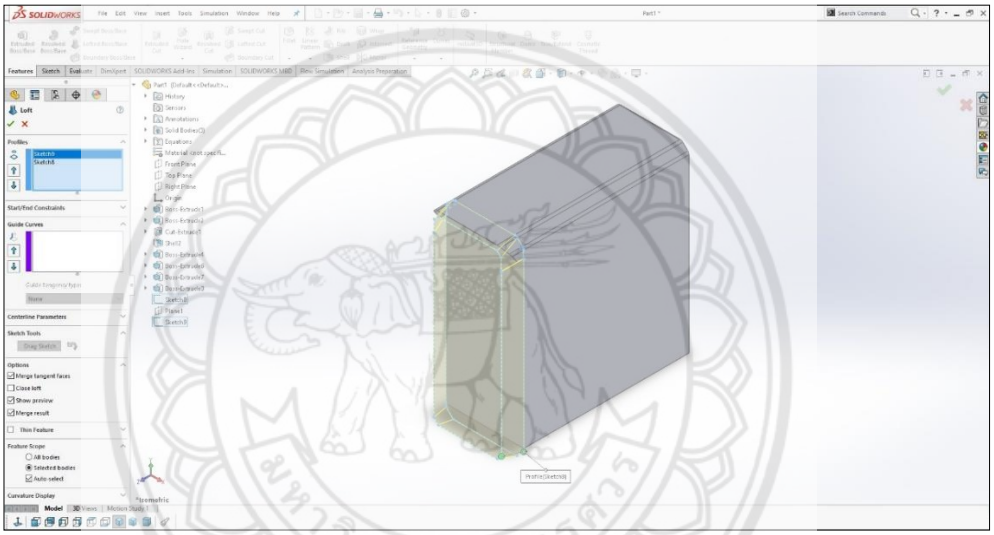
5.13 คลิก OK

5.14 คลิกเลือกคำสั่ง Exit Sketch

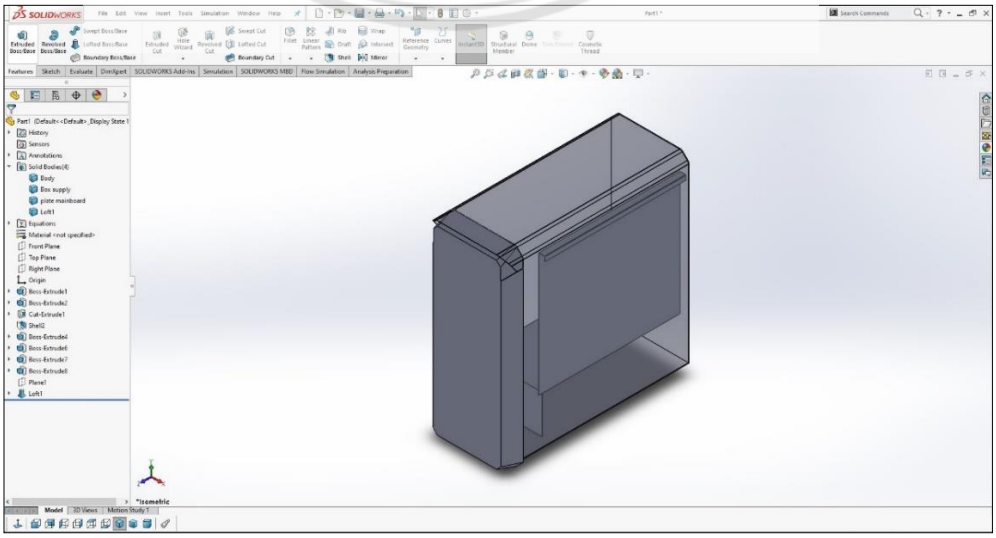
5.15 คลิก Features เลือกคำสั่ง Lofted Boss/Base

5.15.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

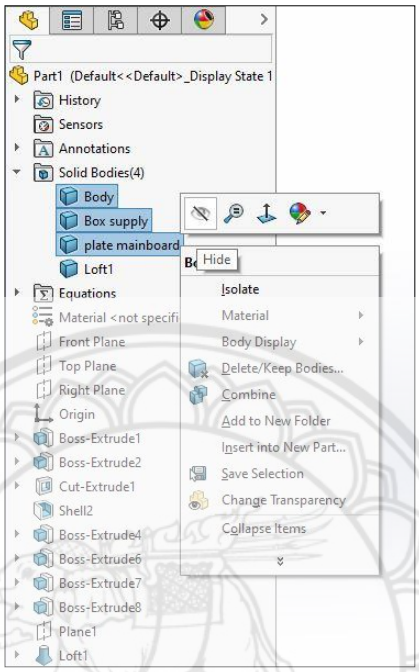
5.15.2 เลือก Sketch ที่สร้างใหม่ ทั้ง 2 Sketch



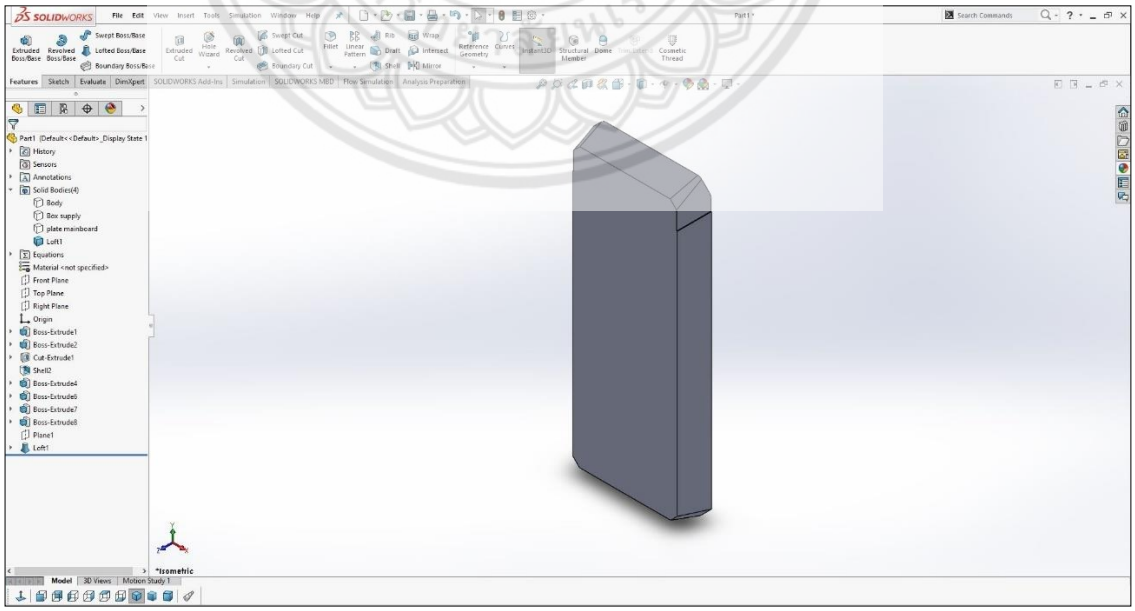
5.15.3 คลิก OK



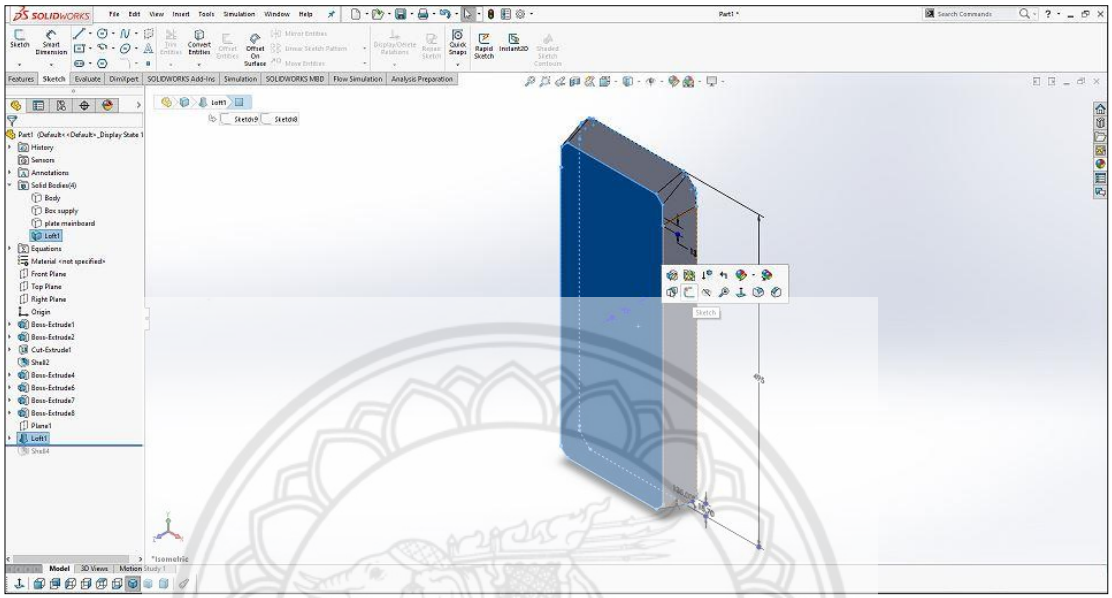
5.16 คลิกเลือกทุก Part ยกเว้นแผงหน้า



5.17 เลือกคำสั่ง Hide จากเมนู เพื่อซ่อน Part



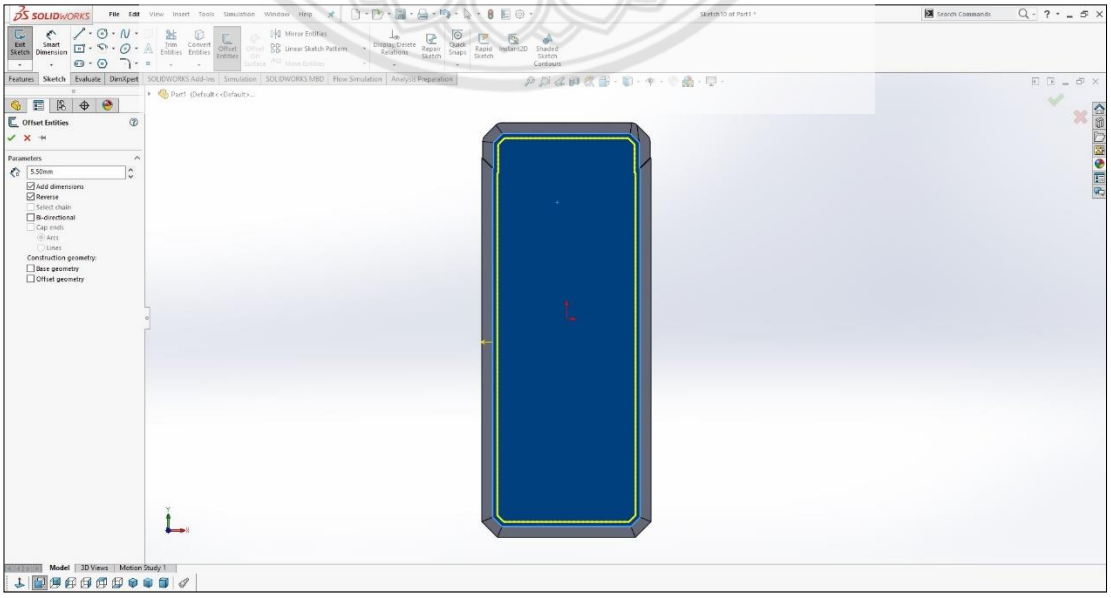
5.18 เลือกพื้นที่ด้านหน้าของแผง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



5.19 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

5.20 เลือกคำสั่ง Offset Entities

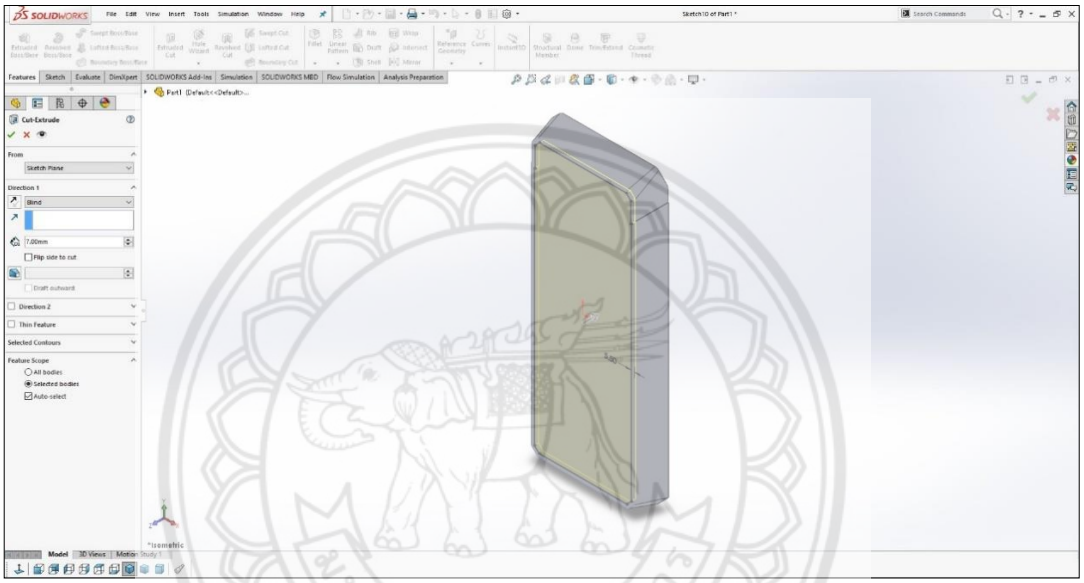
จากเมนู และกำหนด Depth (ระยะของการ Offset) 5.50 mm



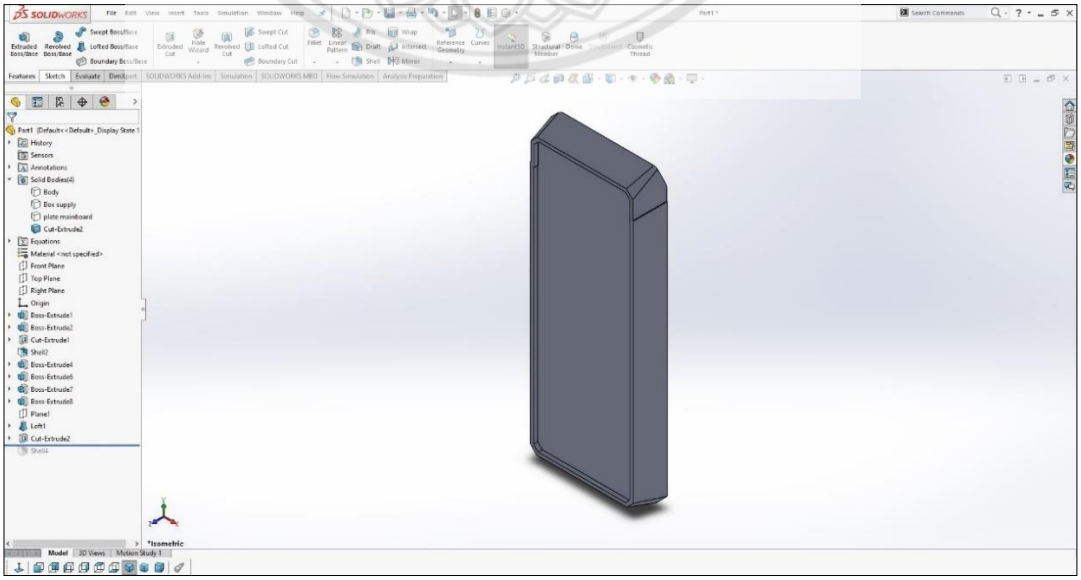
5.21 คลิก OK

5.22 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

5.23 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut และกำหนด Depth (ความลึกของการตัด) 7 mm



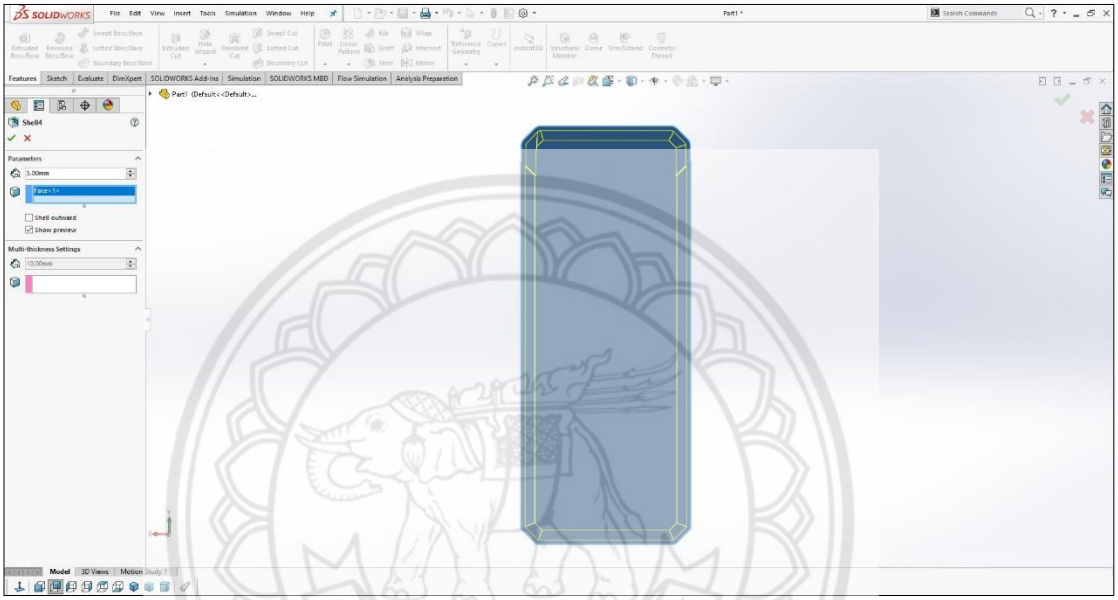
5.24 คลิก OK



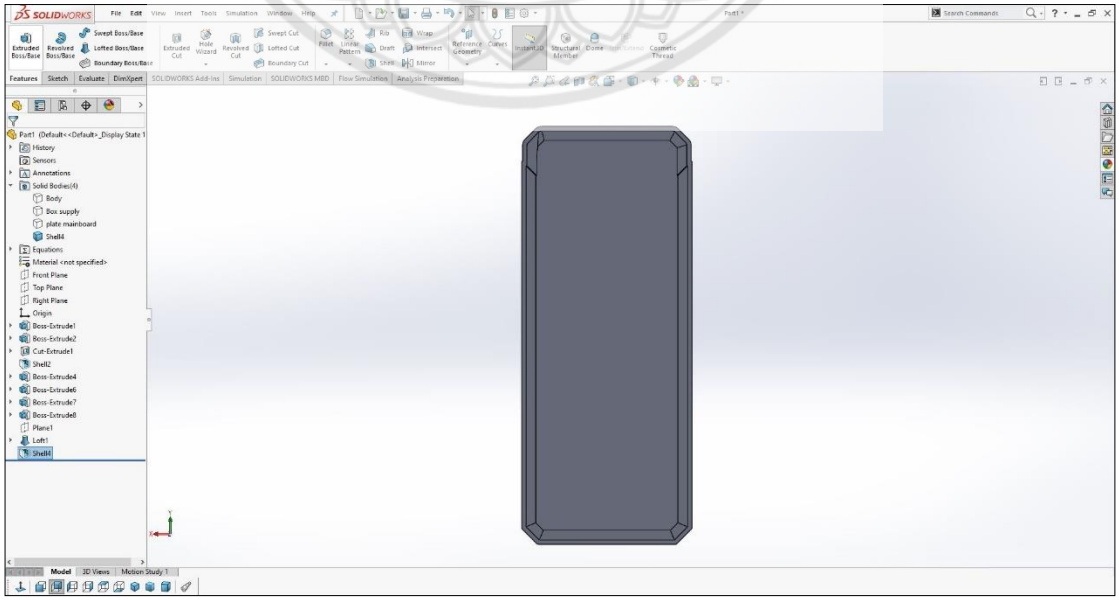
5.25 การ Shell ของแผงด้านหน้าเคส

5.25.1 เลือกคำสั่ง Shell จากเมนู

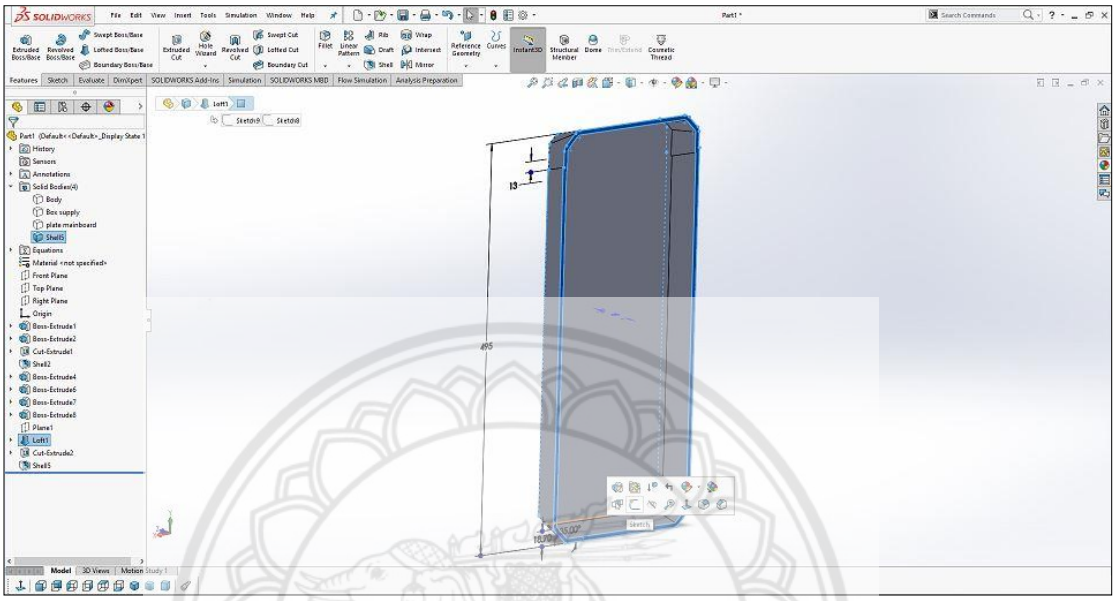
5.25.2 เลือกพื้นที่ต้องการ Shell และกำหนด Depth (ความหนาของ Shell) 5 mm



5.25.3 คลิก OK

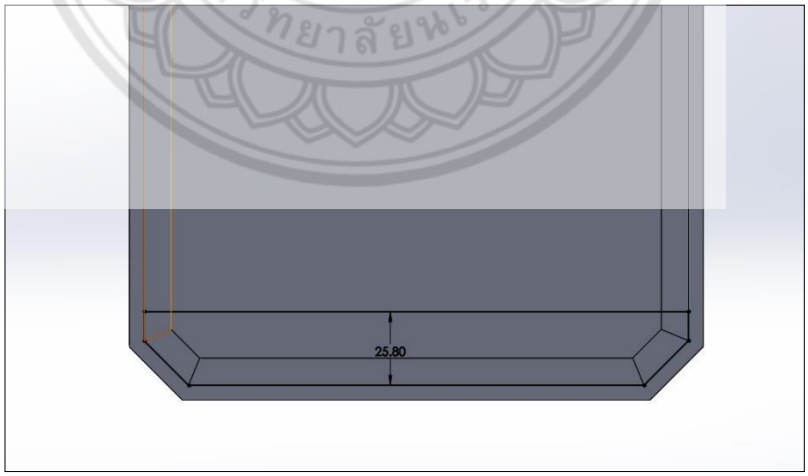


5.26 เลือกพื้นที่ด้านหลังของแผง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



5.27 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

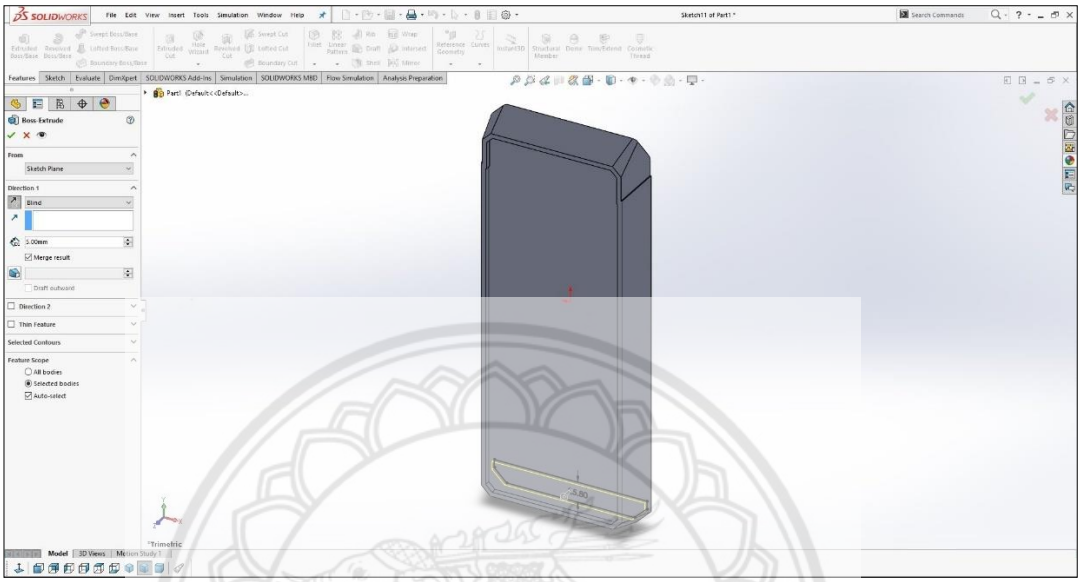
5.28 เลือกคำสั่ง Line จากเมนู เพื่อสร้างเส้นที่ห่างจากพื้น 25.80 mm



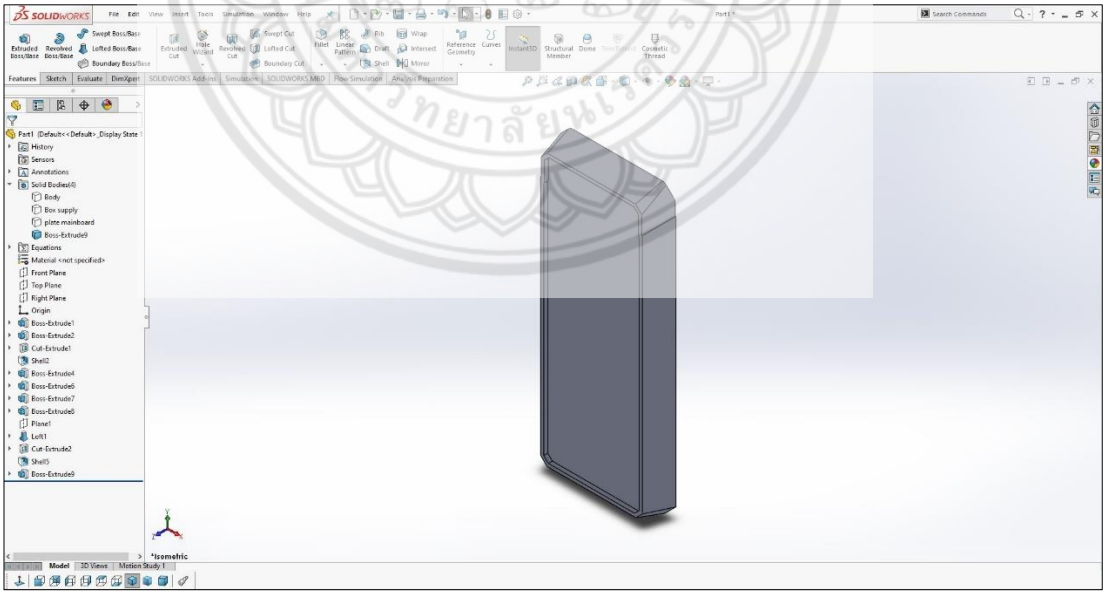
5.29 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

5.30 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

5.31 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



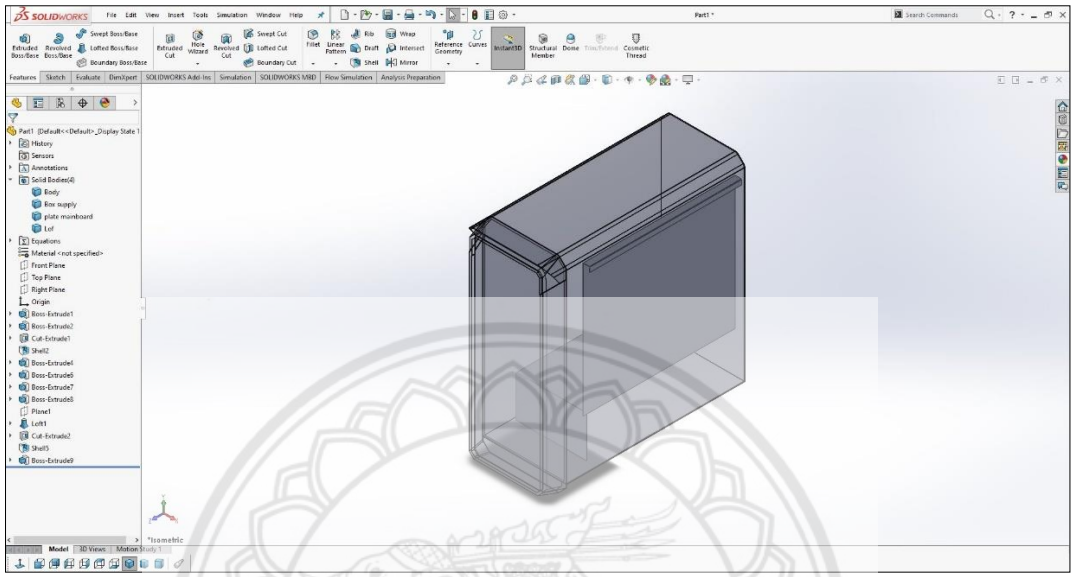
5.32 กำหนด Depth (ความยาวของการ Extruded) 5 mm แล้วคลิก OK ✔



6. การเจาะช่องสำหรับการผ่านของอากาศ

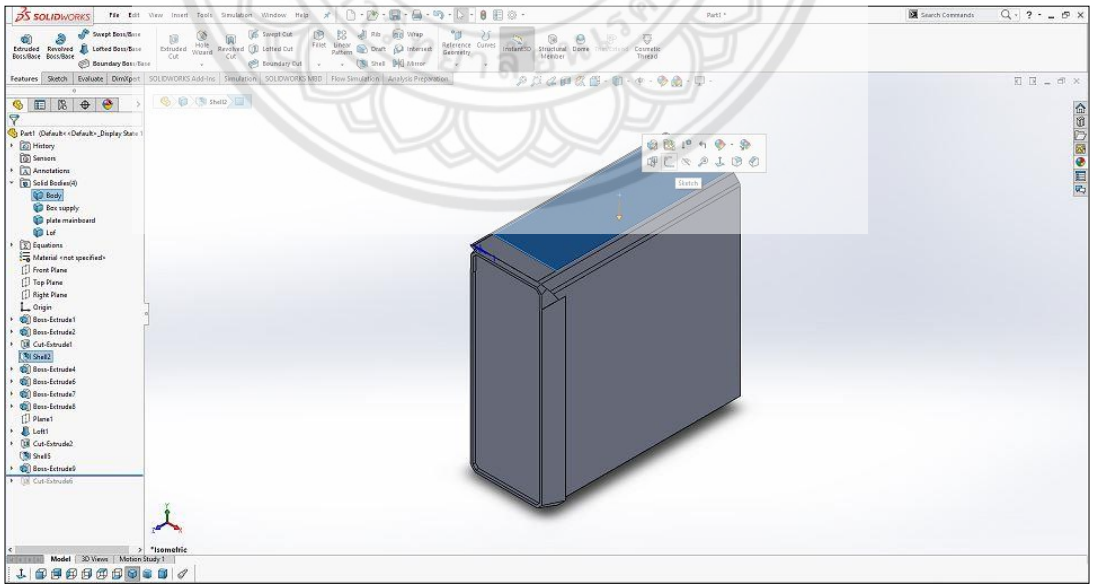
6.1 คลิกเลือกทุก Part ยกเว้นแผงหน้า

6.2 เลือก Hide สำหรับทุก Part ออก



6.3 การเจาะรูอากาศด้านบน

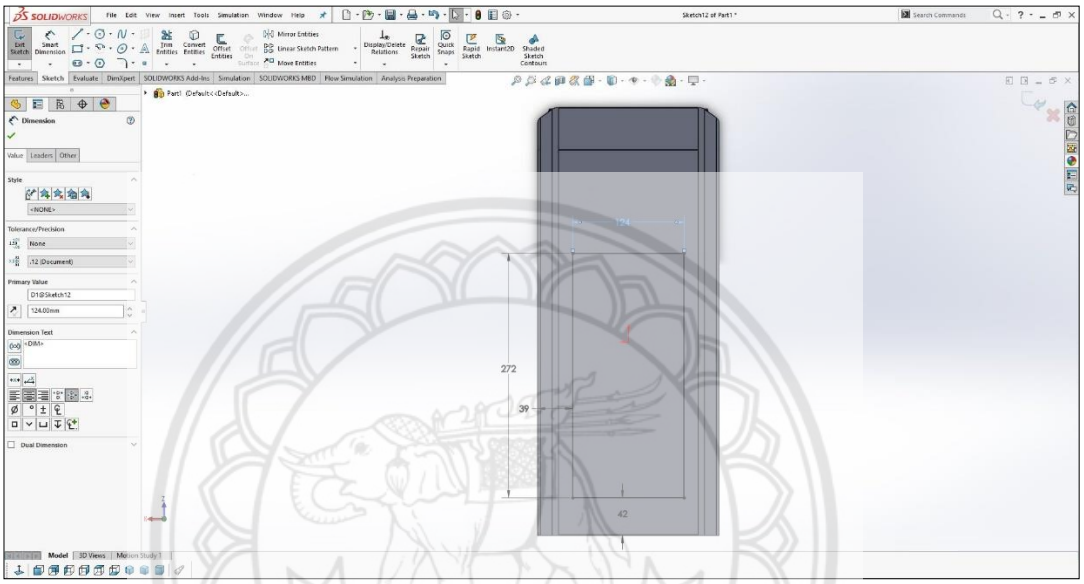
6.3.1 เลือกพื้นที่ด้านบน แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



6.3.2 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

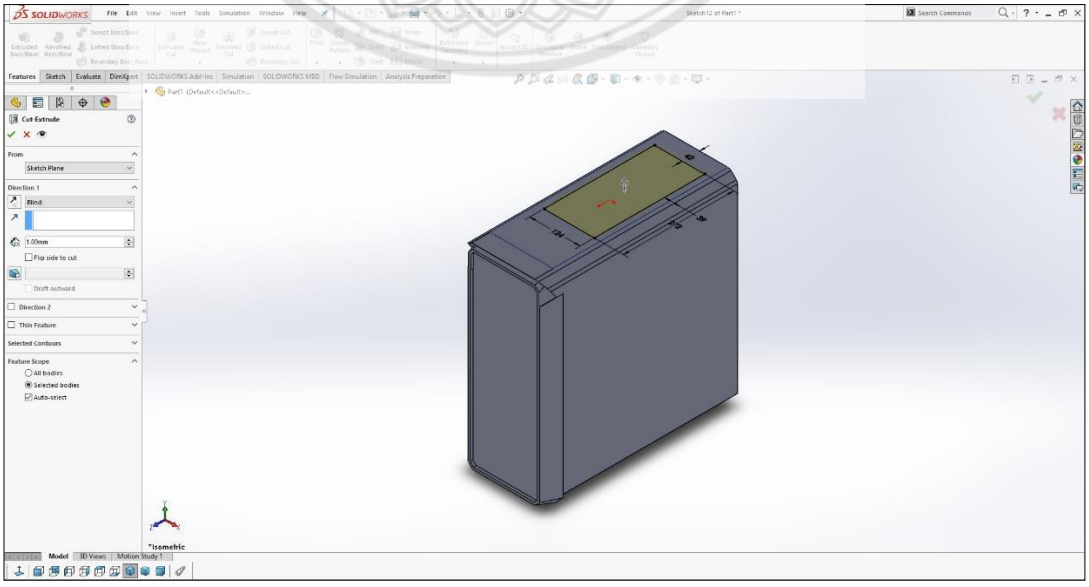
6.3.3 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

6.3.4 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 124 mm ยาว 272 mm ที่ห่างจากด้านข้างเคส 39 mm ห่างจากด้านหลังเคส 42 mm

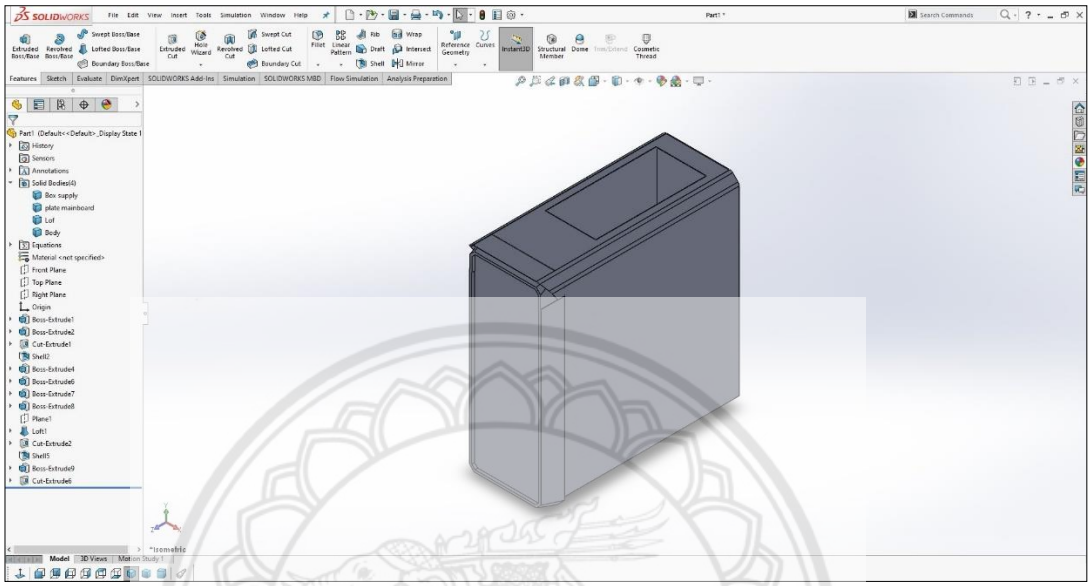


6.3.5 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

6.3.6 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ blind 1 mm

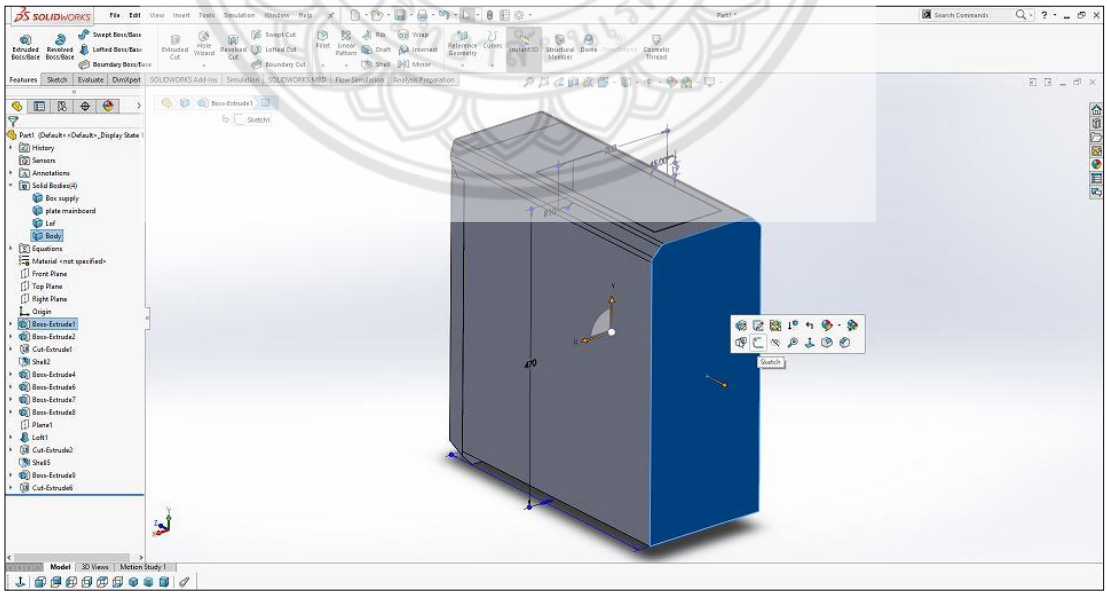


6.3.7 คลิก OK



6.4 การเจาะรูอากาศด้านหลัง

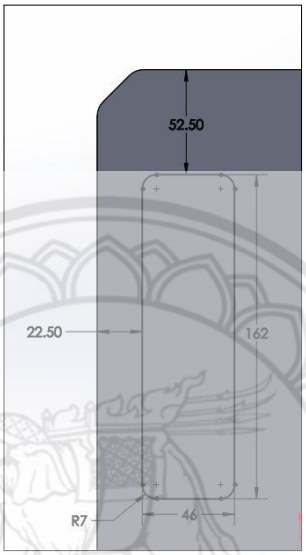
6.4.1 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



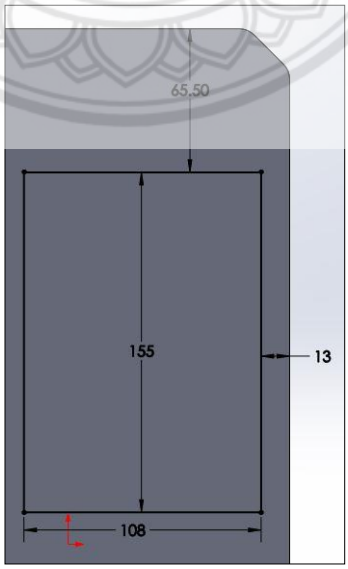
6.4.2 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

6.4.3 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

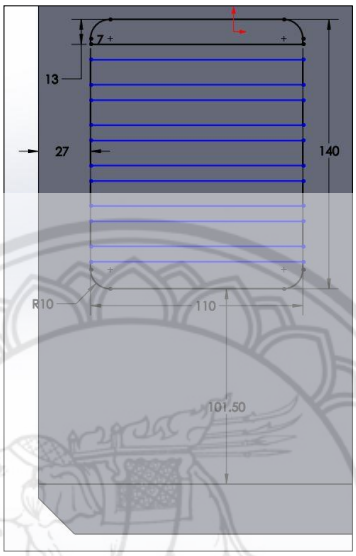
6.4.4 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 46 mm ยาว 162 mm ระยะจากด้านบน 52.50 mm ระยะจากด้านซ้าย 22.50 mm และลบมุมรัศมี 7 mm



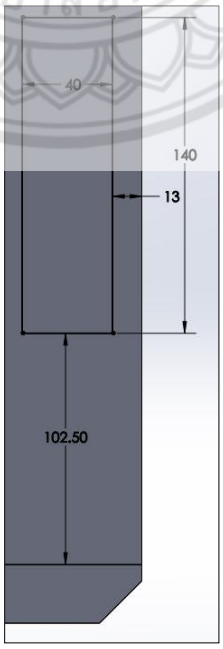
6.4.5 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 108 mm ยาว 155 mm ระยะจากด้านบน 65.50 mm ระยะจากด้านขวา 13 mm



6.4.5 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 110 mm ยาว 140 mm ระยะจากด้านล่าง 101.50 mm ระยะจากด้านซ้าย 27 mm ลบมุมรัศมี 10 mm และสร้างสี่เหลี่ยม 7 ชิ้น ระยะห่างแต่ละชิ้น 8 mm กว้าง 110 mm ยาว 13 mm

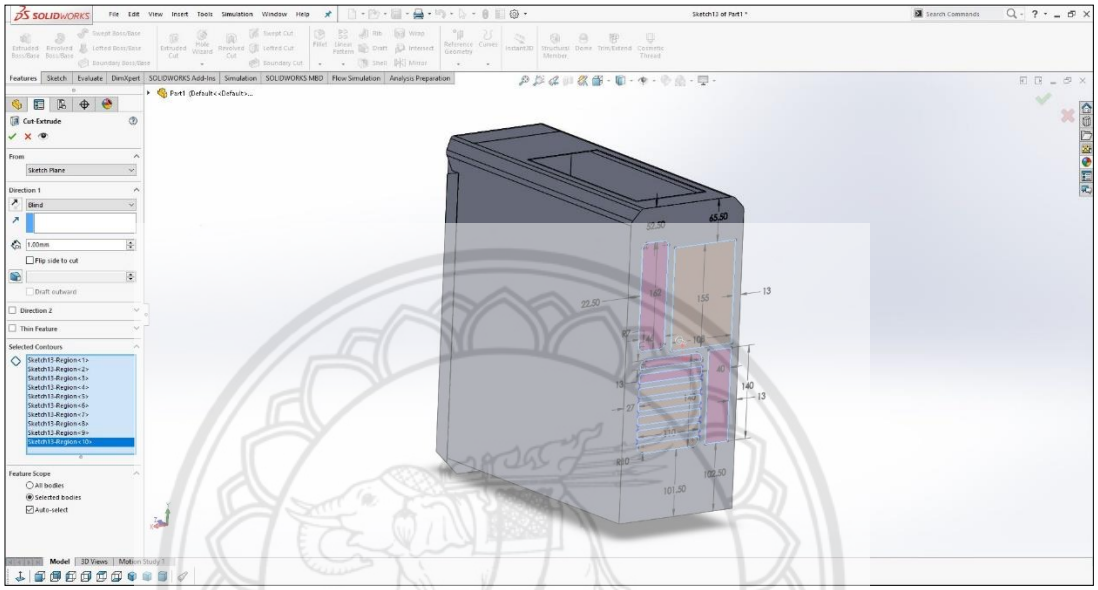


6.4.6 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 40 mm ยาว 140 mm ระยะจากด้านล่าง 102.50 mm ระยะจากด้านขวา 13 mm

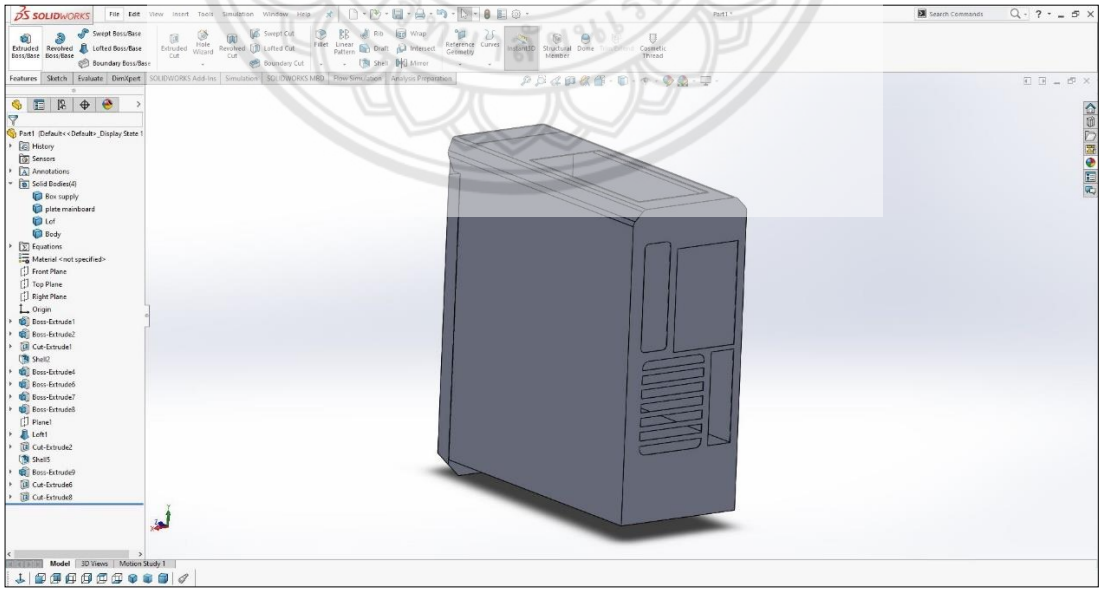


6.4.7 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

6.4.8 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ blind 1 mm



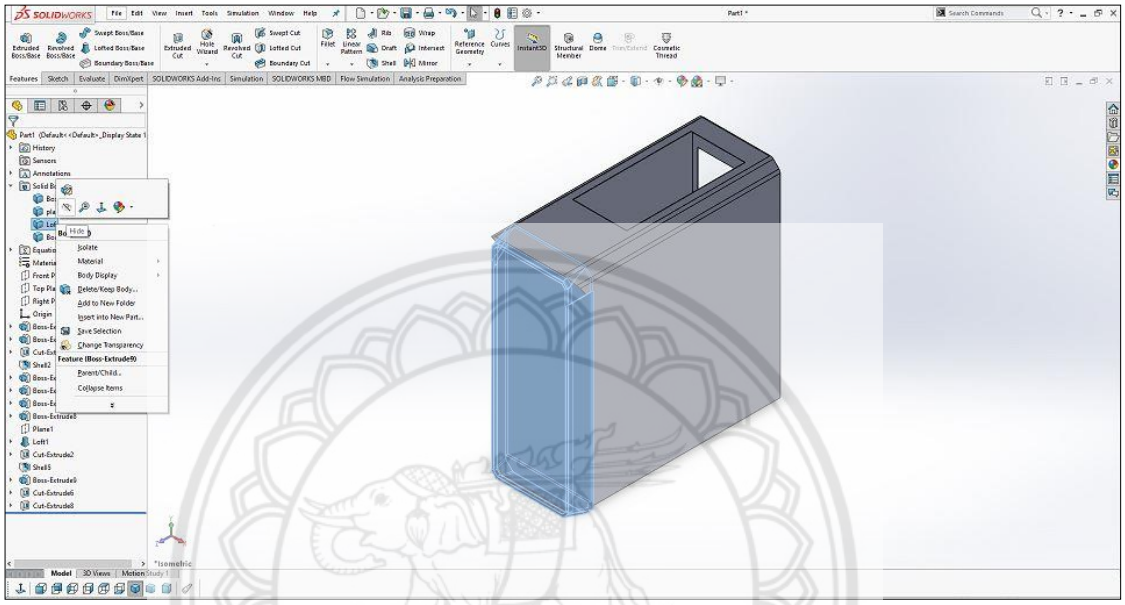
6.4.9 คลิก OK



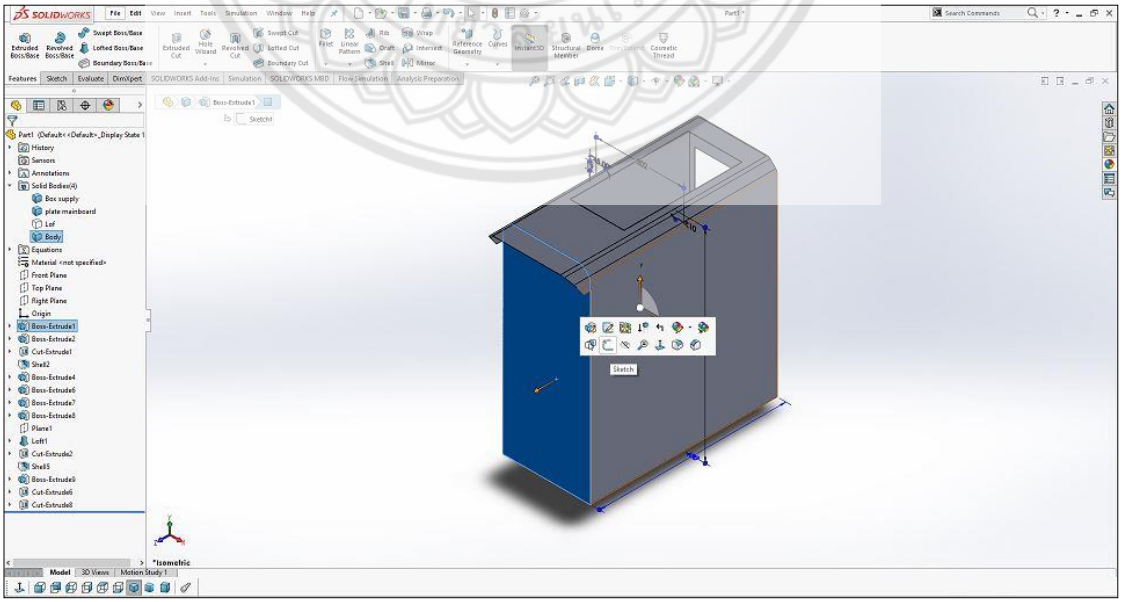
6.5 การเจาะรูอากาศด้านหน้า

6.5.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

6.5.2 เลือก Part ของแผงด้านหน้า แล้วเลือกคำสั่ง Hide จากเมนู



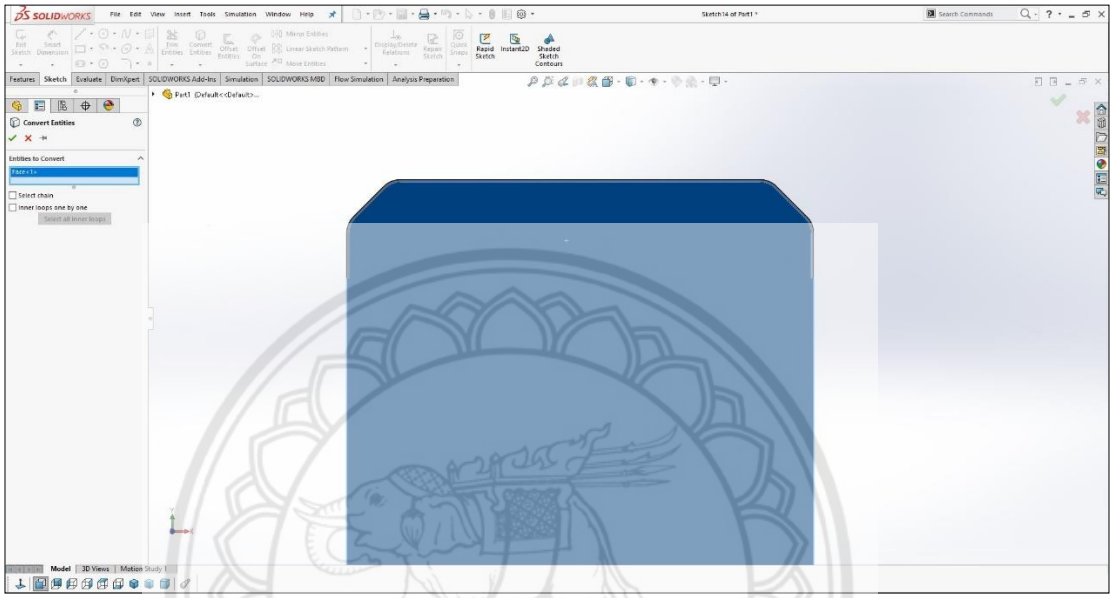
6.5.3 เลือกพื้นที่ด้านหน้า แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



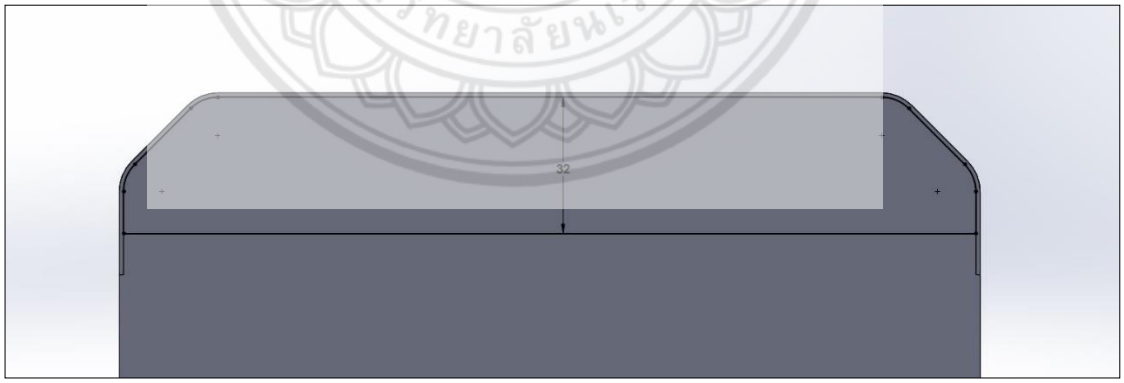
6.5.4 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

6.5.5 เลือกคำสั่ง Convert Entities

จากเมนู แล้วเลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส

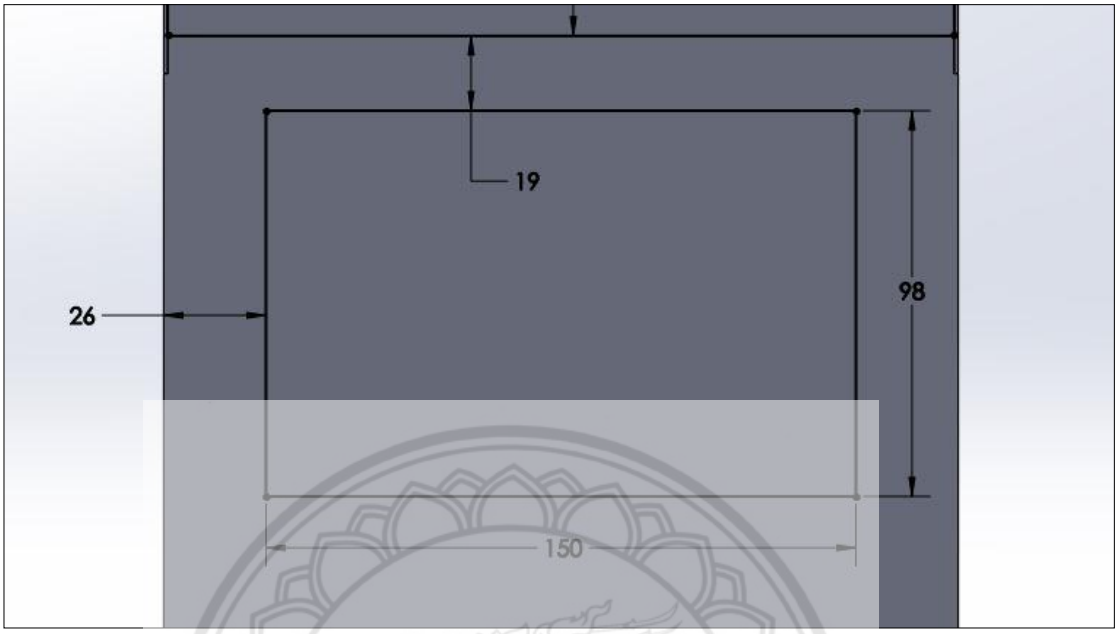


6.5.6 เลือกคำสั่ง Line จากเมนู สร้างเส้นที่มีระยะจากด้านบน 32 mm

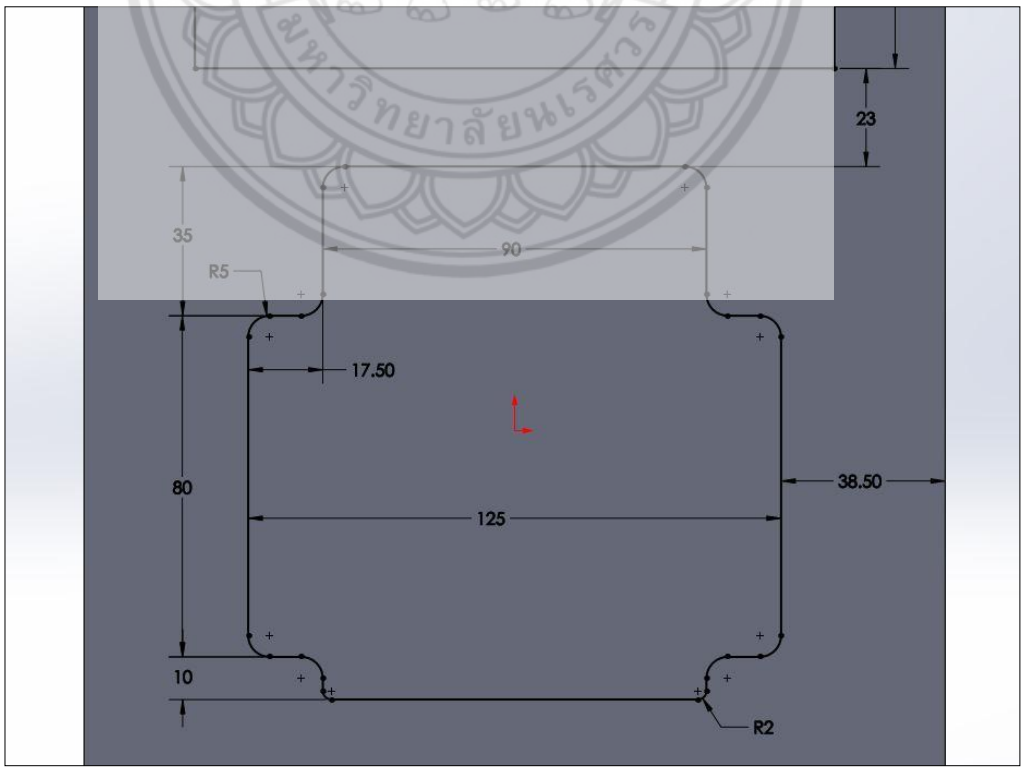


6.5.7 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

6.5.8 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 150 mm ยาว 98 mm ระยะจากด้านบน 19 mm ระยะจากด้านซ้าย 26 mm

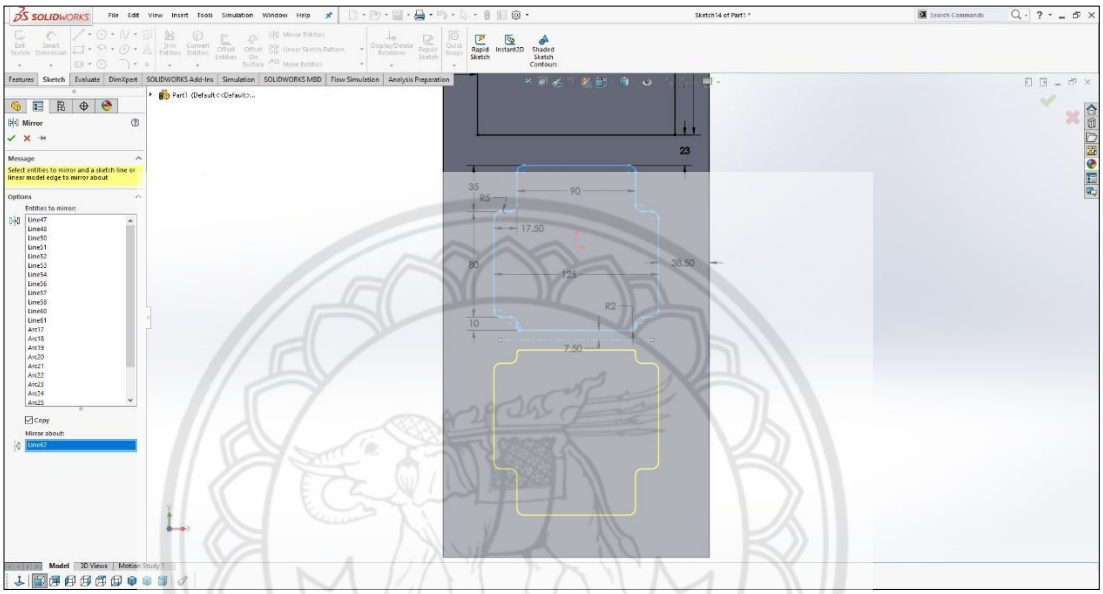


6.5.9 สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 90 mm ยาว 35 mm และ กว้าง 125 mm ยาว 80 mm ระยะจากด้านบน 23 mm ระยะจากด้านขวา 38.50 mm ลบมุม 5 mm กับ 2 mm

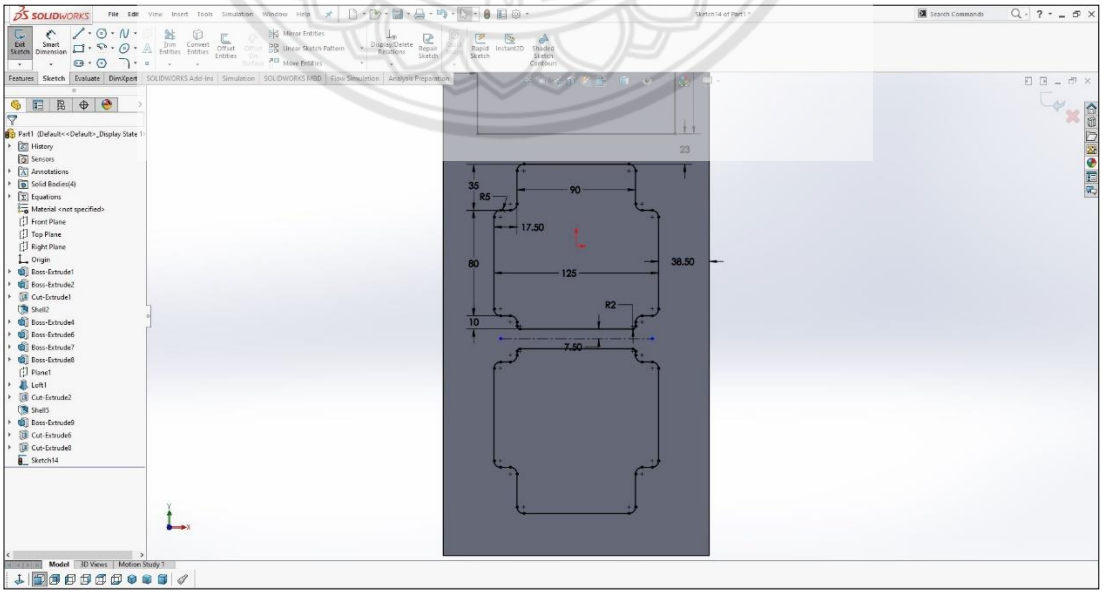


6.5.10 เลือกคำสั่ง Centerline สร้างเส้นเพื่อทำการ Mirror เป็น ระยะ 7.50 mm

6.5.11 เลือกคำสั่ง Mirror Entities จากแถบเมนู



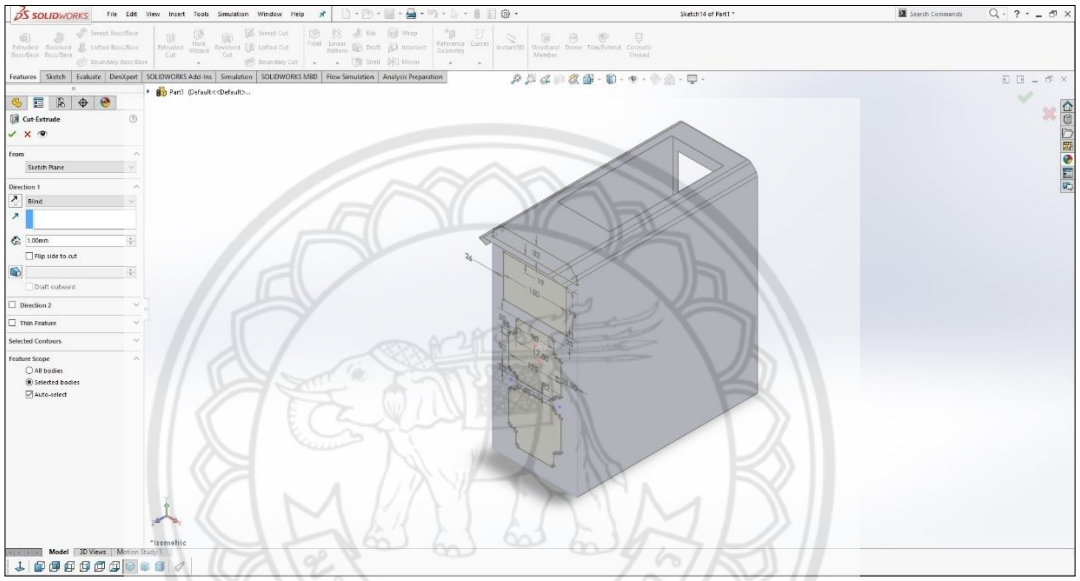
6.5.12 คลิก OK



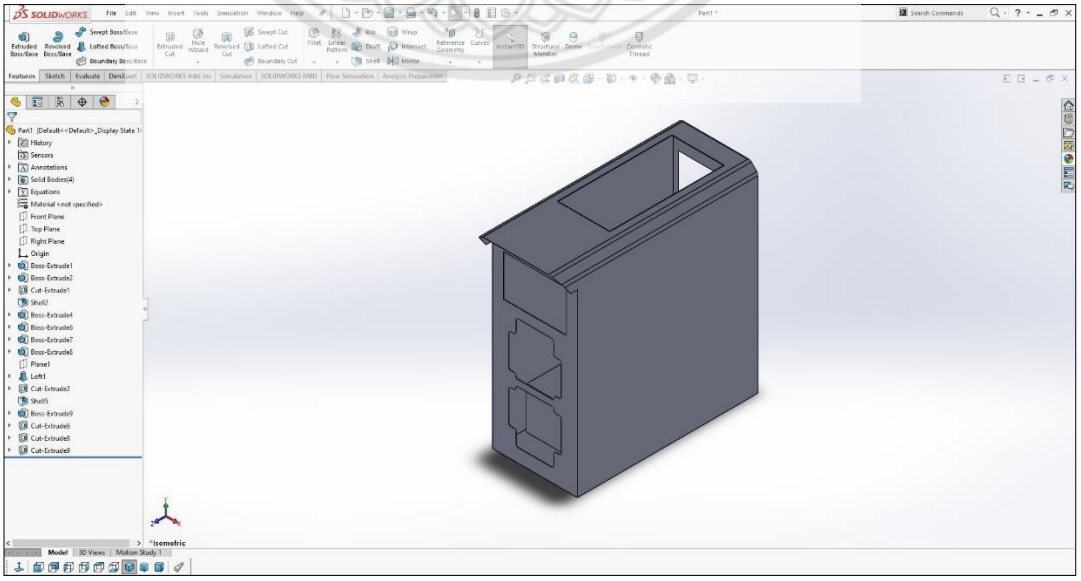
6.5.13 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

6.5.14 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

6.5.14 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1 mm

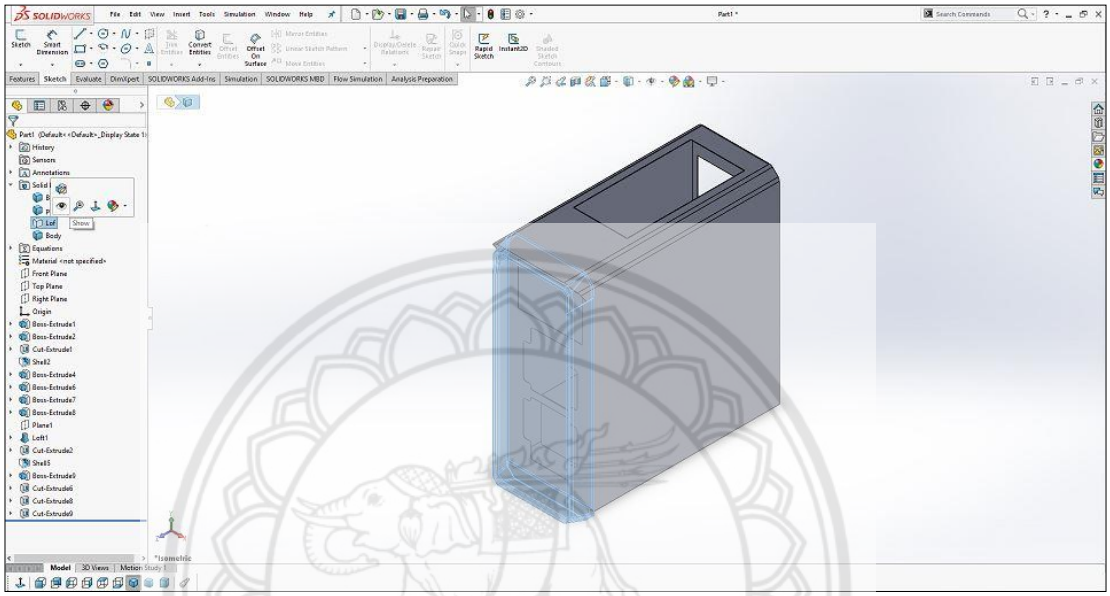


6.5.15 คลิก OK

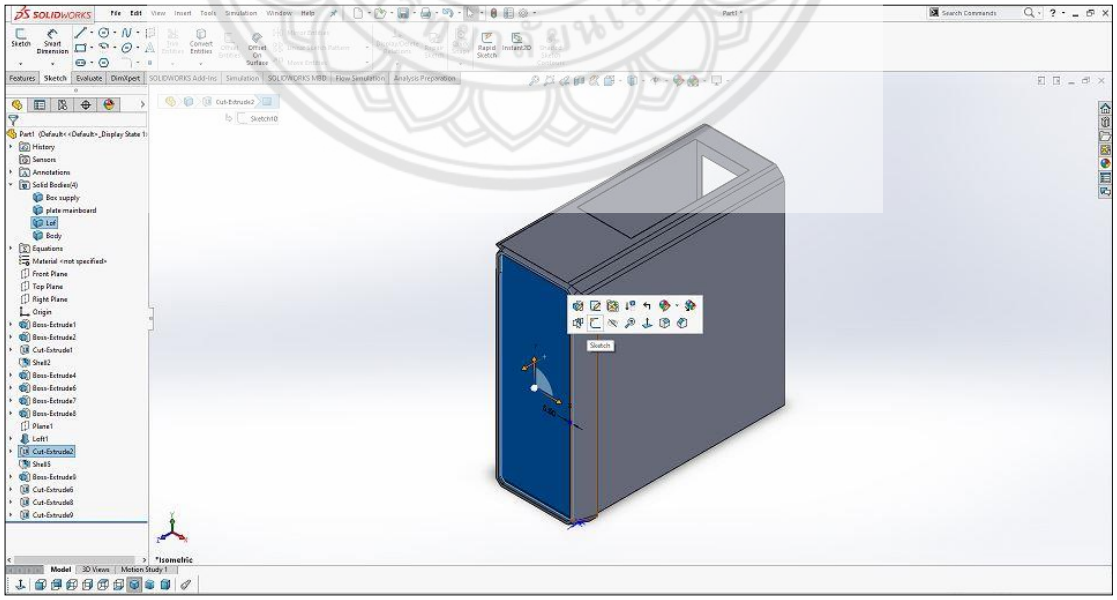


6.6 การเจาะรูอากาศแผงด้านหน้าเคส

6.6.1 เลือก Hide สำหรับ Part ของแผงหน้าเคสออก



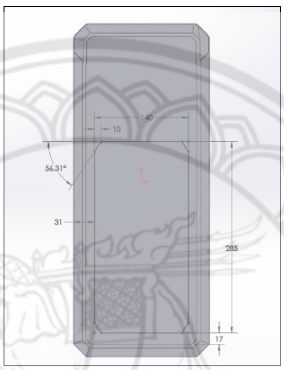
6.6.2 เลือกพื้นที่ด้านหน้าของแผงหน้าเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch



6.6.3 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

6.6.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

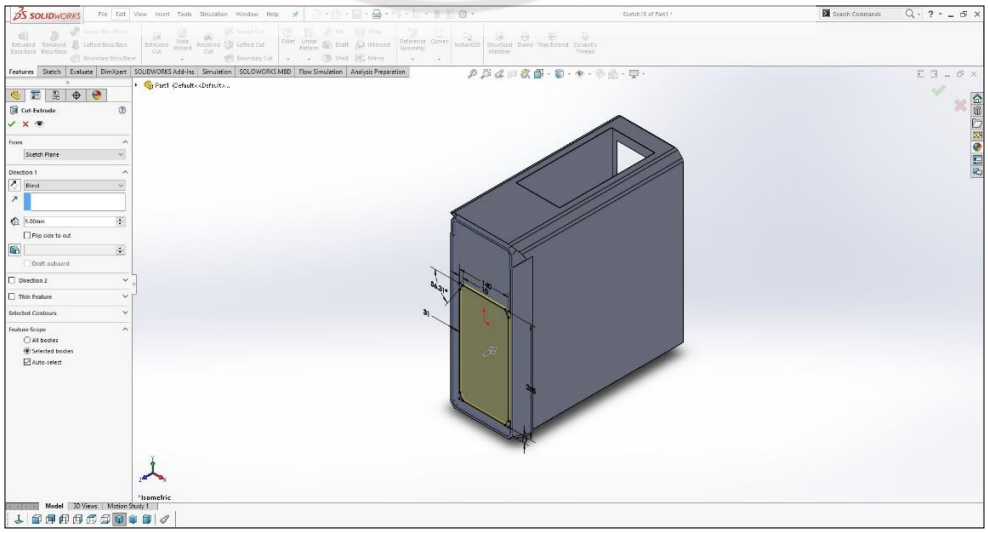
6.6.5 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 150 mm ยาว 98 mm ระยะจากด้านบน 19 mm ระยะจากด้านซ้าย 26 mm และเลือกคำสั่ง Sketch Chamfer แล้วกำหนด Depth (ระยะของการ Chamfer) 10 mm ที่ 56.31°



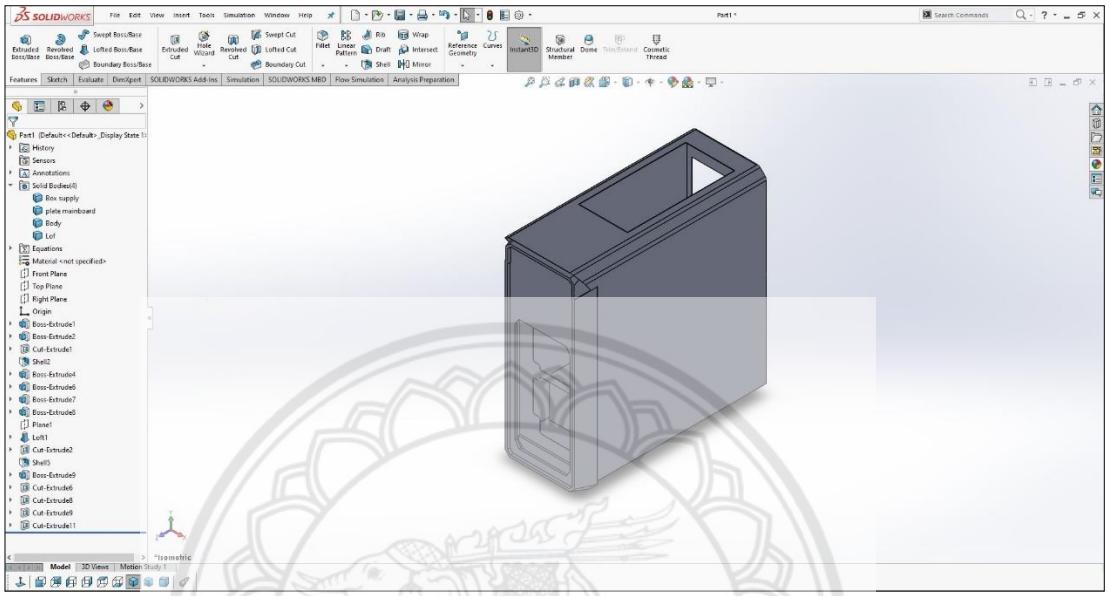
6.6.6 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

6.6.7 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

6.6.8 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 5 mm

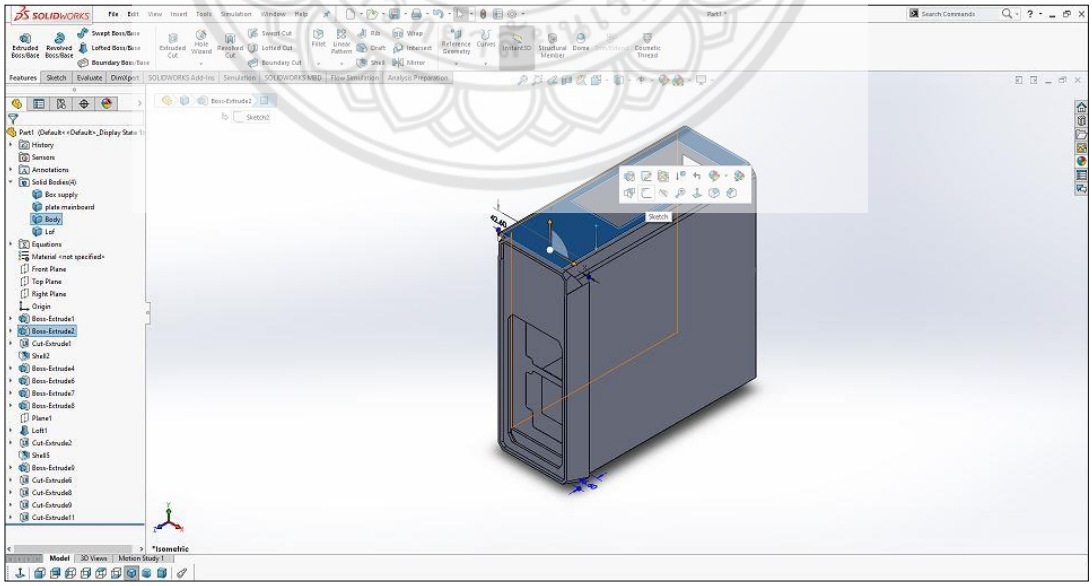


6.6.9 คลิก OK



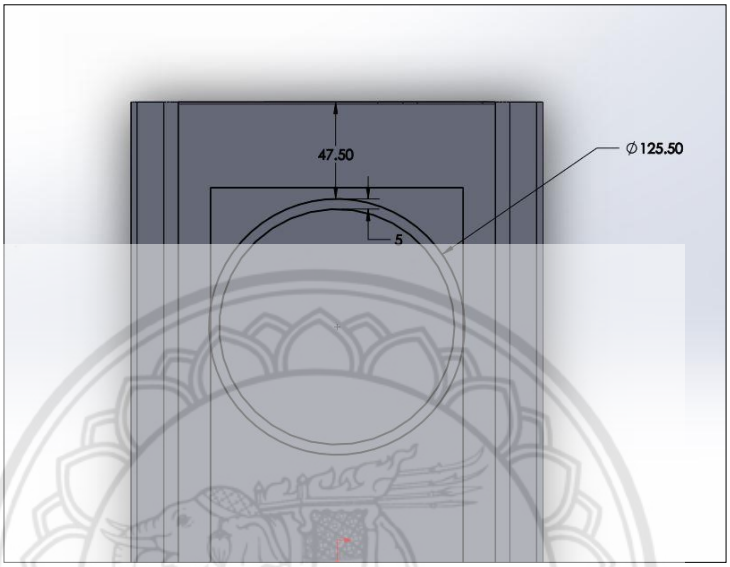
7. การสร้างวงกลมของพัดลม

7.1 เลือกพื้นที่ด้านบนของเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



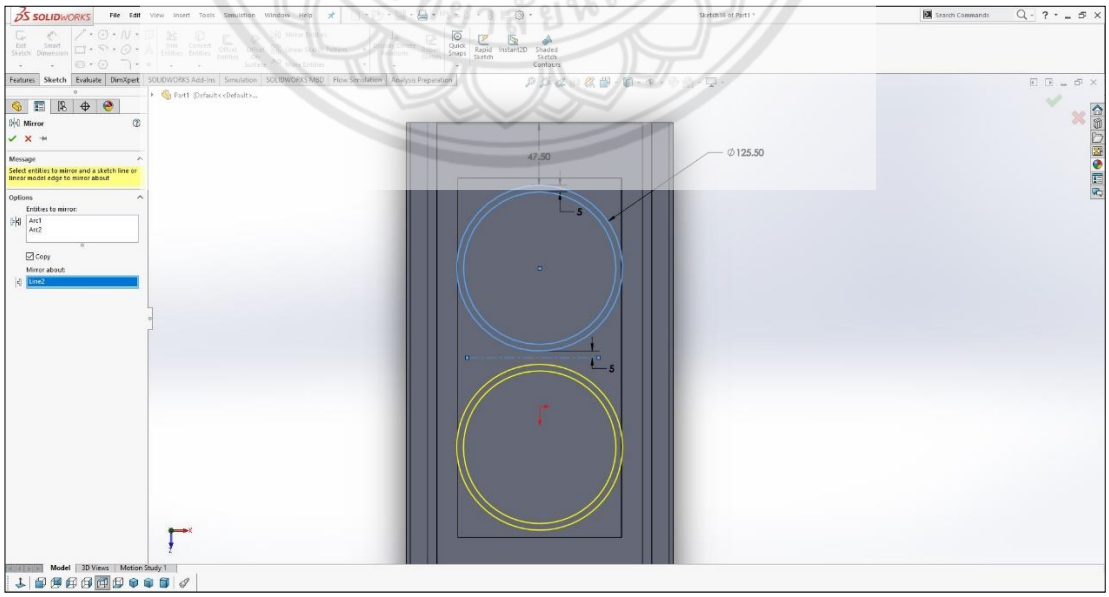
7.2 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

7.3 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (รัศมีของวงกลม) 125.5 mm และอีก Circle กำหนด Depth (รัศมีห่างจากวงนอก) 5 mm

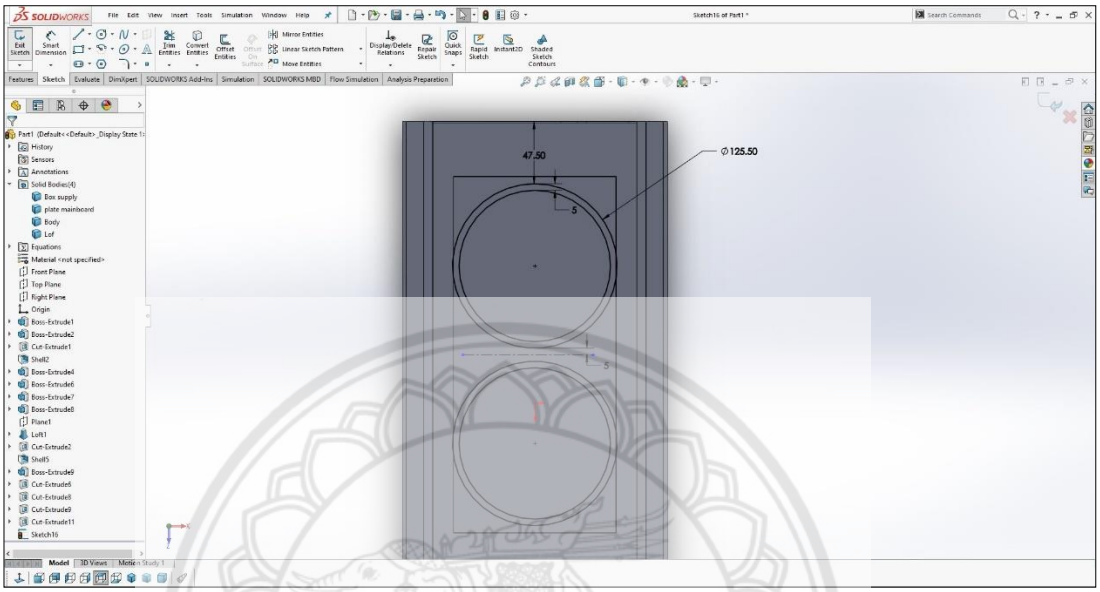


7.4 เลือกคำสั่ง Centerline สร้างเส้นเพื่อทำการ Mirror เป็นระยะ 5 mm

7.5 เลือกคำสั่ง Mirror Entities คลุมเส้น



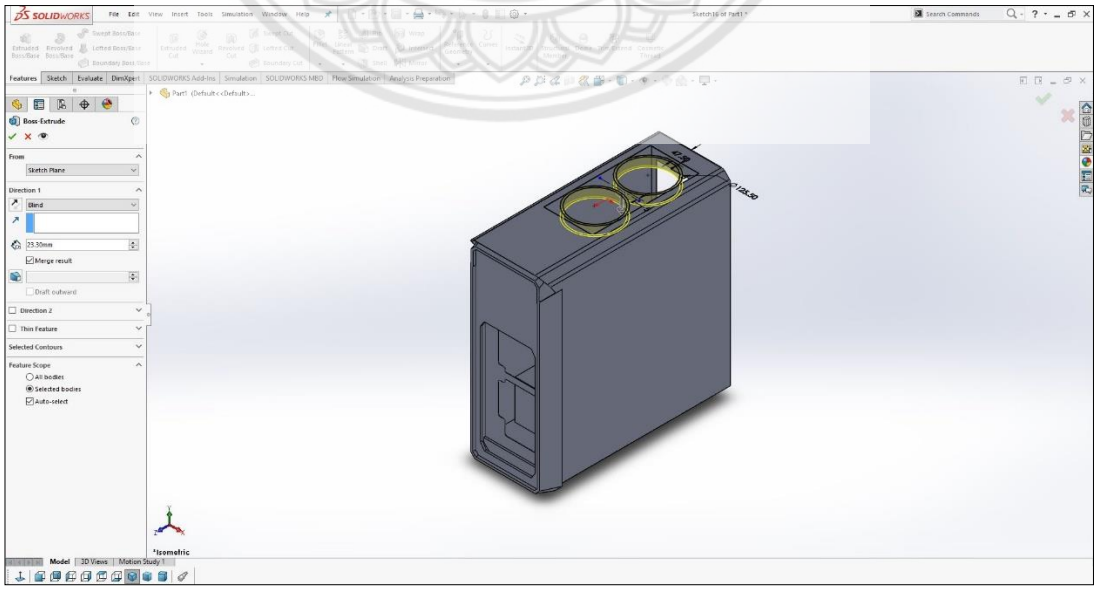
7.6 คลิก OK



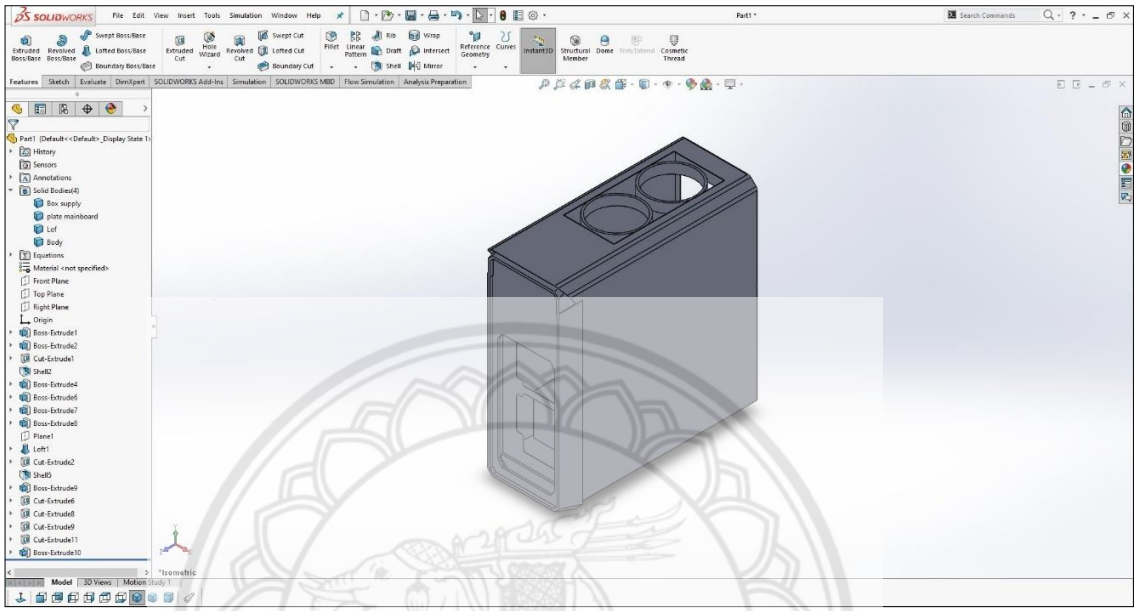
7.7 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

7.8 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

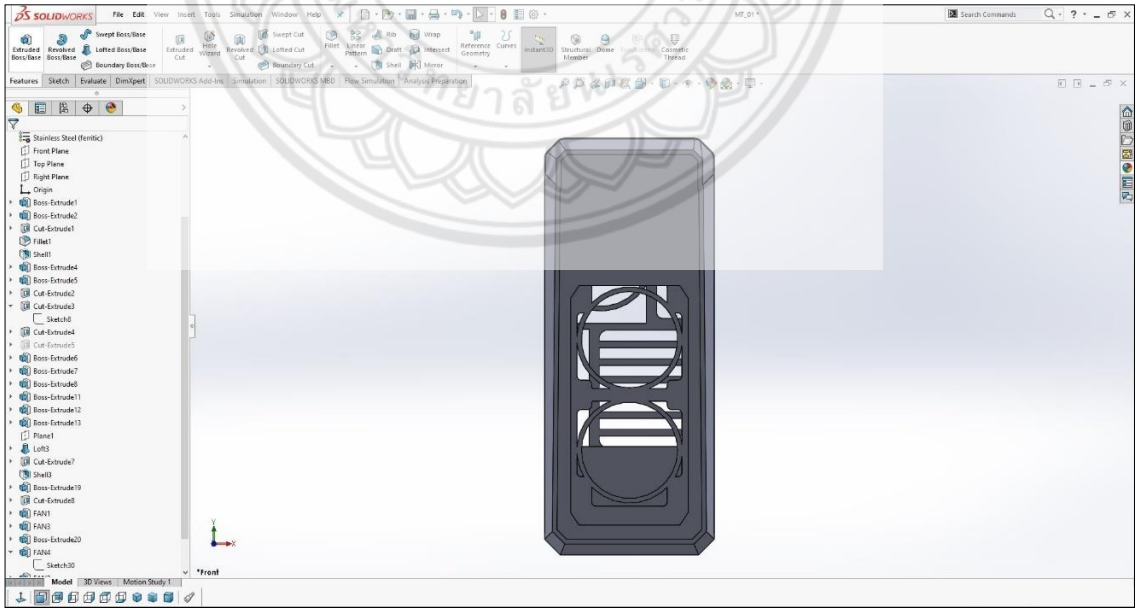
7.9 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 23.30 mm



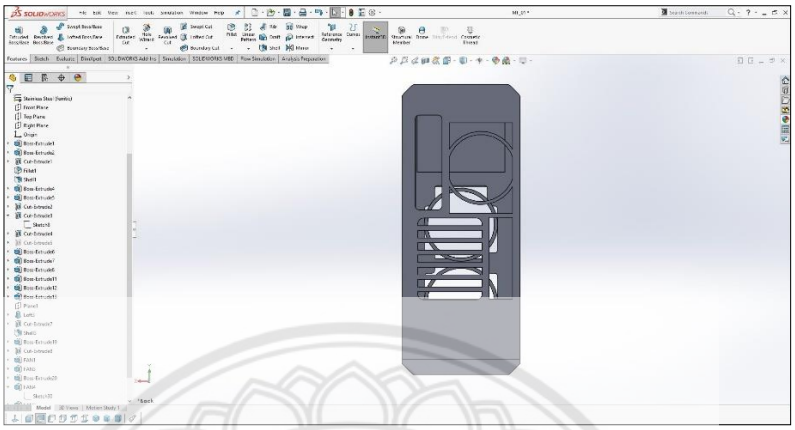
7.10 คลิก OK



7.11 สร้างวงกลมเหมือนข้างต้นเพิ่ม 2 Circle ให้อยู่ระหว่างช่องว่างด้านหน้าเคส



7.12 สร้างวงกลมเหมือนข้างต้นเพิ่ม 1 Circle ให้อยู่ระหว่างช่องว่างด้านหลังเคส



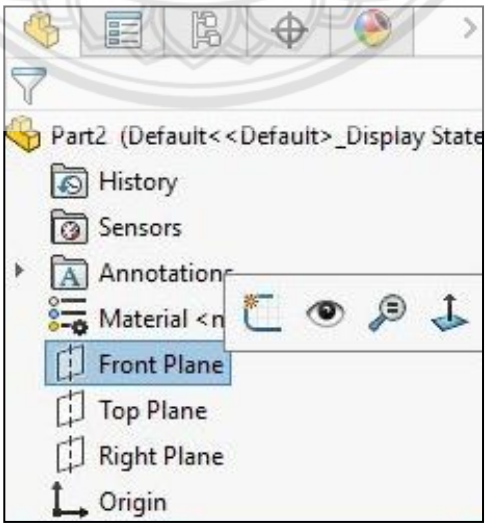
การสร้างเมนบอร์ด (Mainboard)

1. การสร้างแผ่น PCB

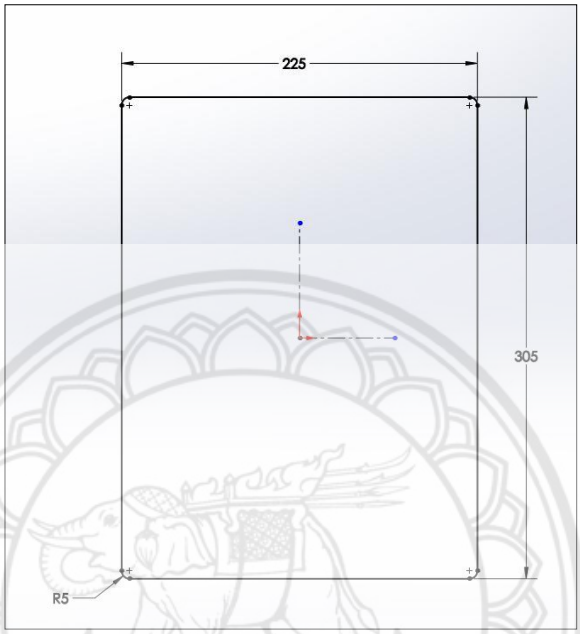
1.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

1.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

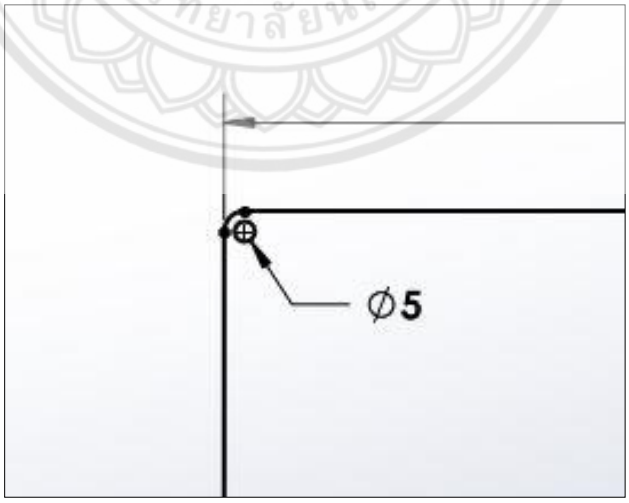
1.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



1.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 225 mm ยาว 305 mm และลบมุมรัศมี 5 mm



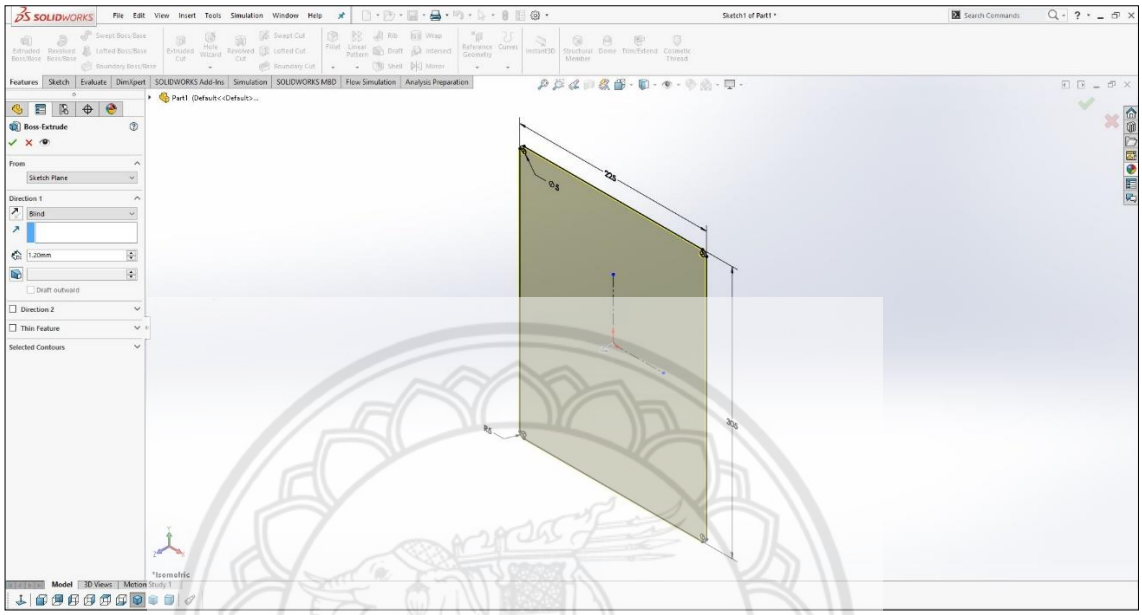
1.5 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู สร้างวงกลม 4 วง และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลาง) 5 mm



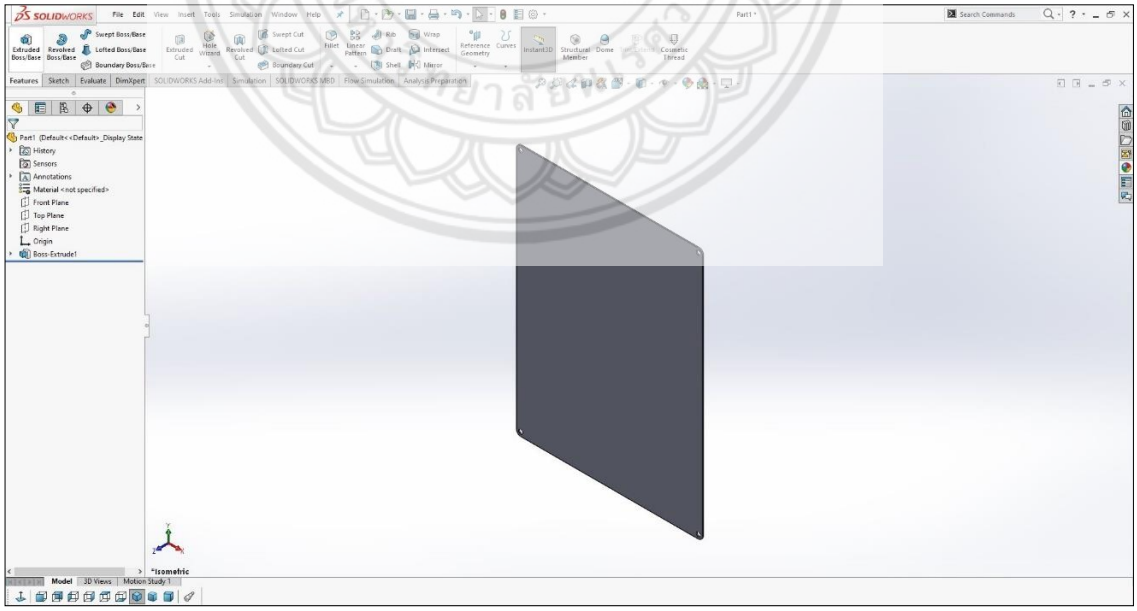
1.6 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

1.7 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

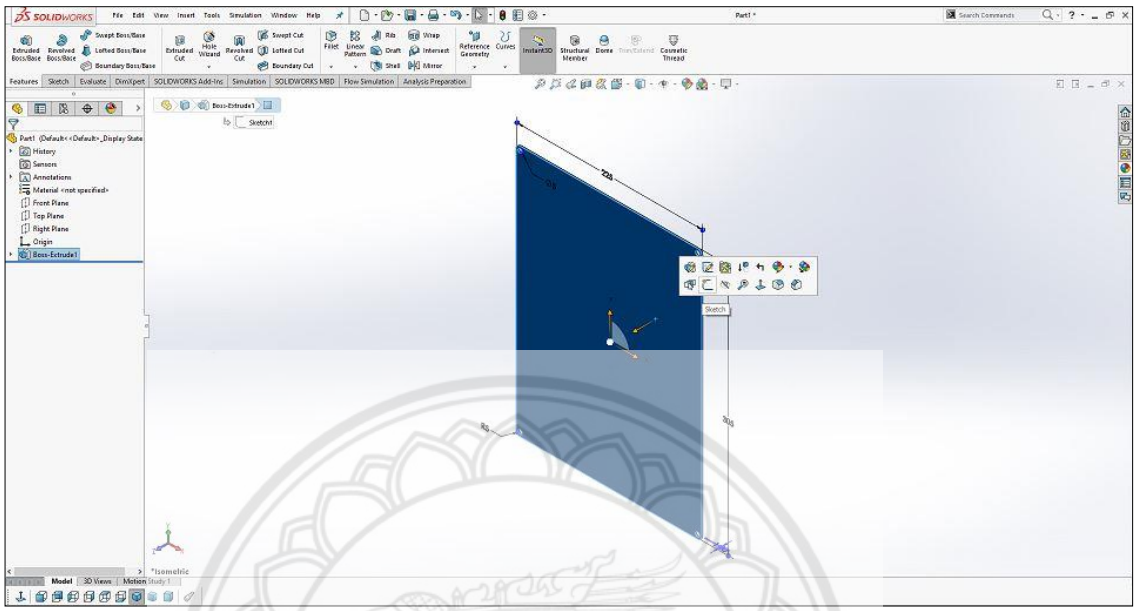
1.8 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



1.9 คลิก OK

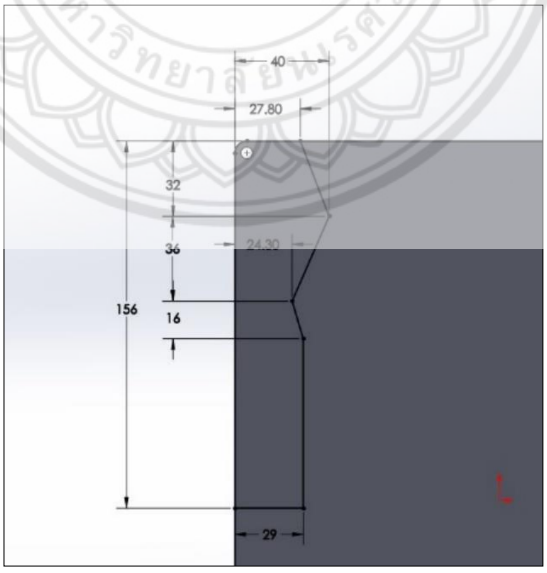


1.10 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหน้า แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



1.9 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

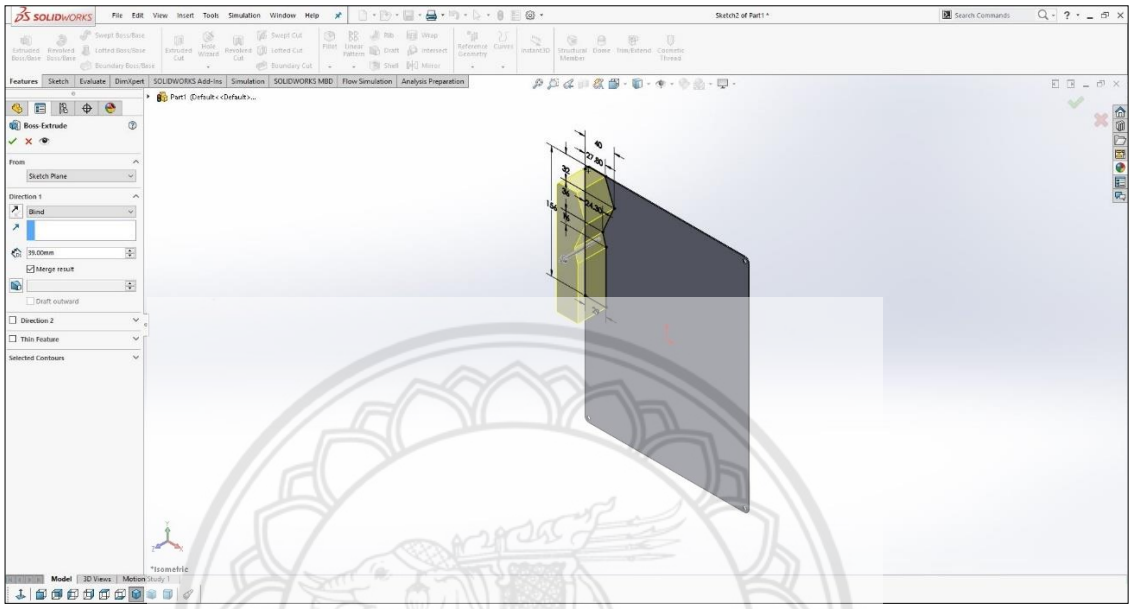
1.10 เลือกคำสั่ง Line สร้างเส้นดังนี้



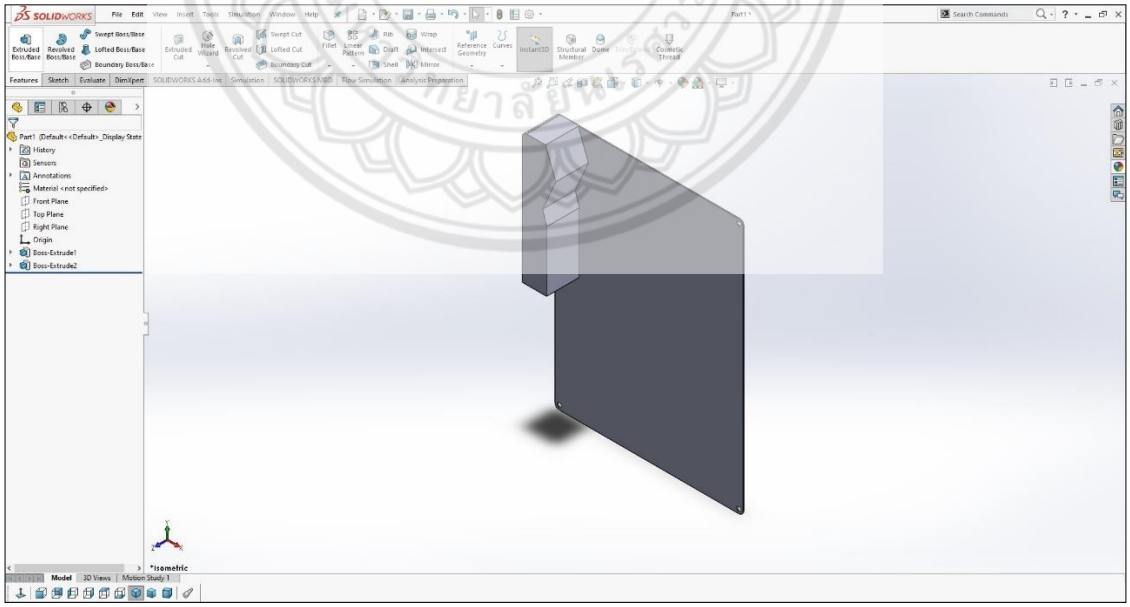
1.10 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

1.11 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

1.12 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 39 mm



1.13 คลิก OK

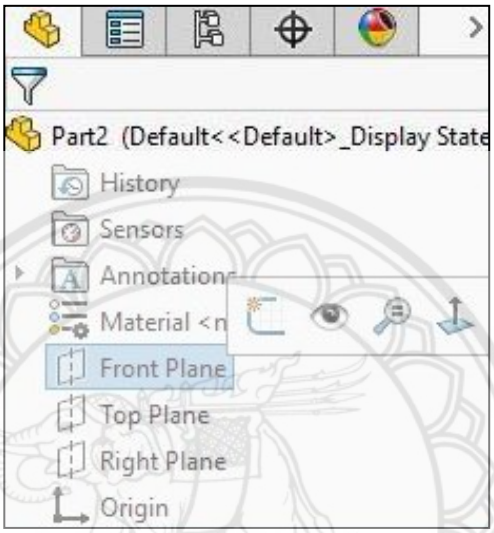


2. การสร้าง CPU

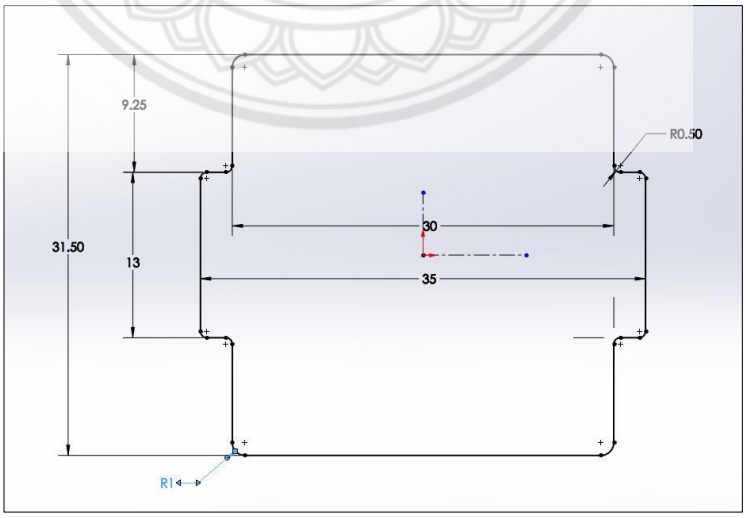
2.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

2.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

2.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



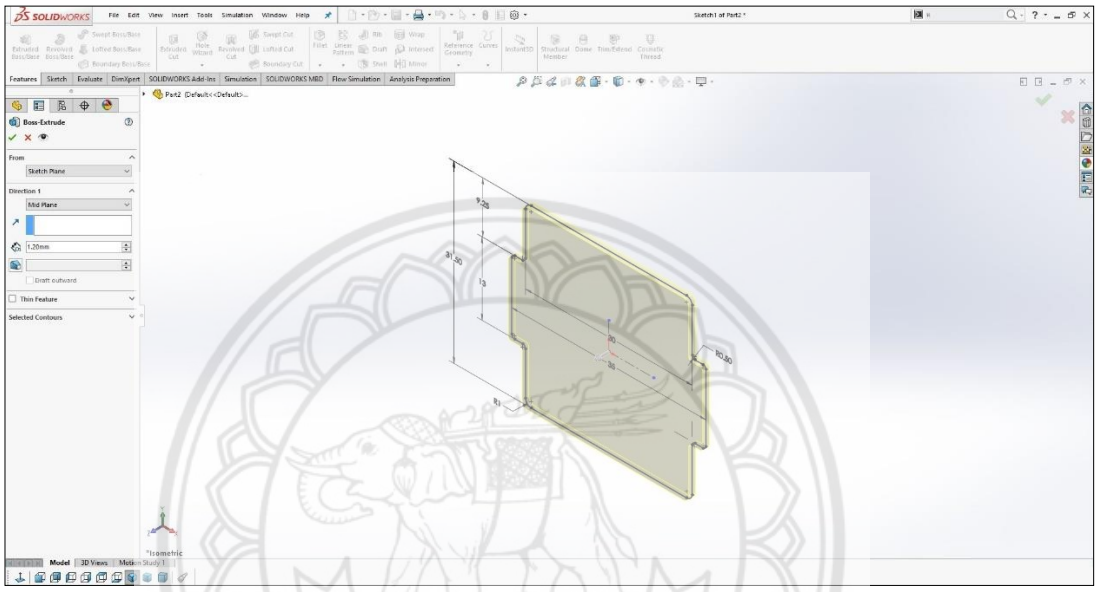
2.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 30 mm ยาว 13 mm และกว้าง 35 mm ยาว 13 mm ลบมุมรัศมี 1 mm กับ 0.5 mm



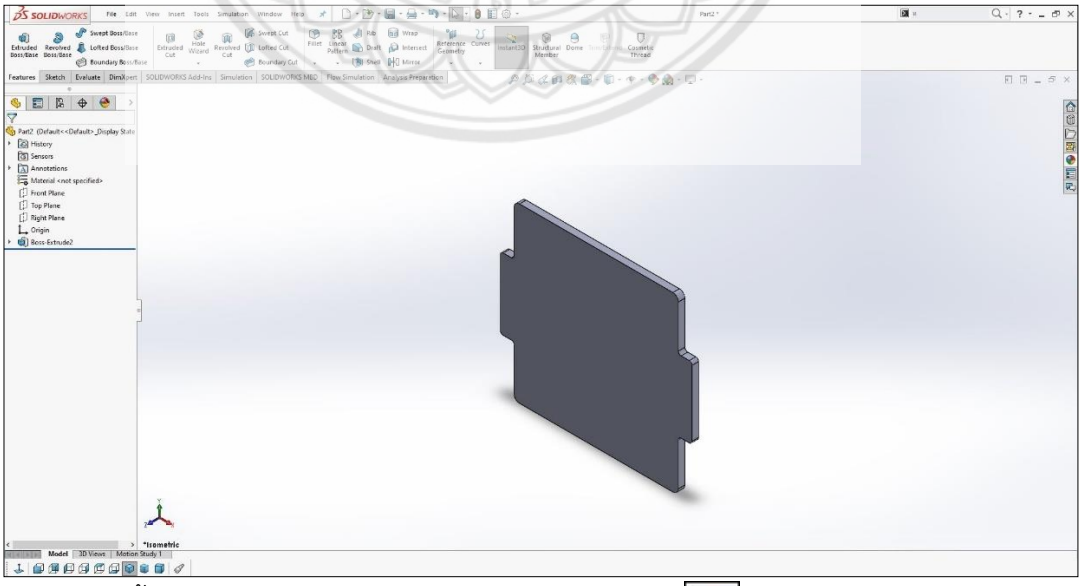
2.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

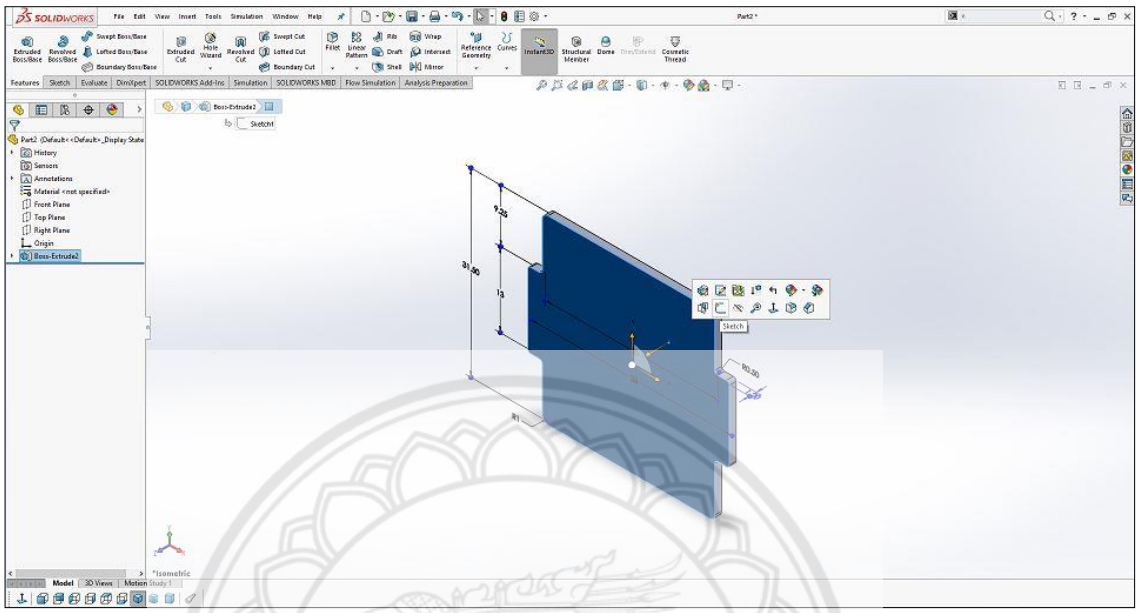
2.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



2.8 คลิก OK

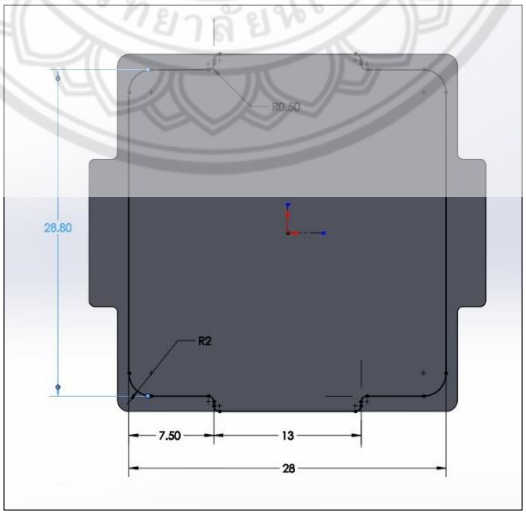


2.9 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหน้า แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



2.10 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

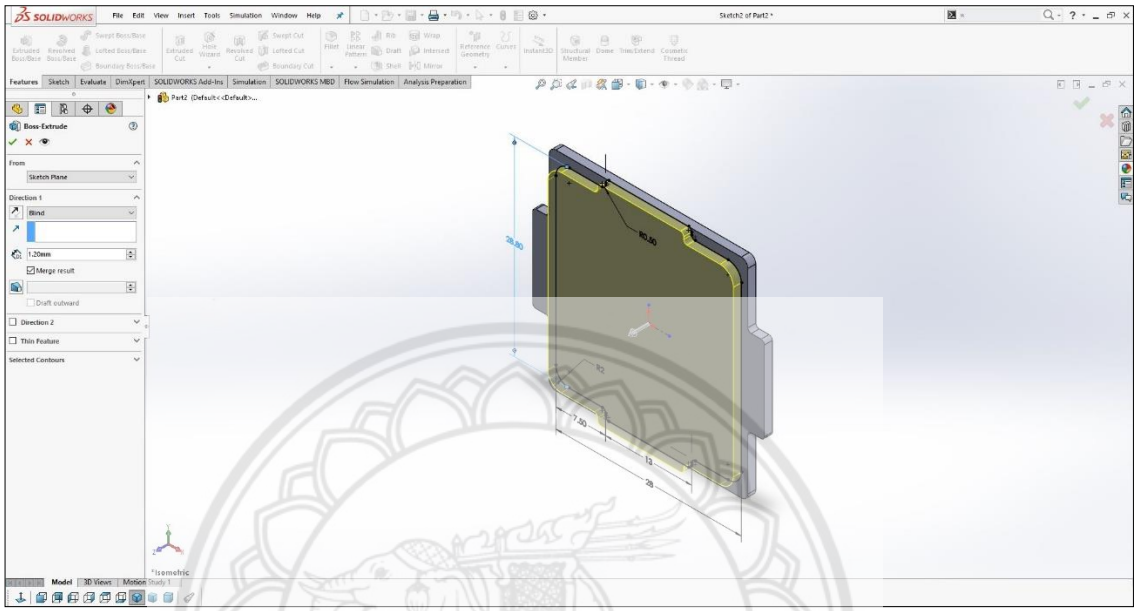
2.11 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 28 mm ยาว 28.80 mm และกว้าง 13 mm ยาว 31.50 mm ลบมุมรัศมี 2 mm กับ 0.5 mm



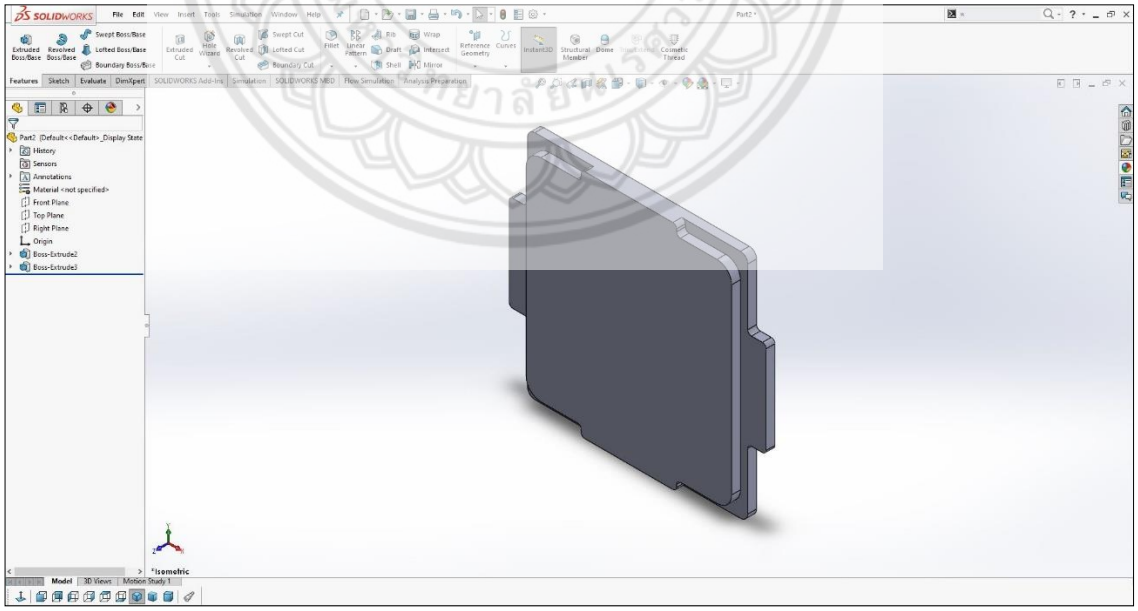
2.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

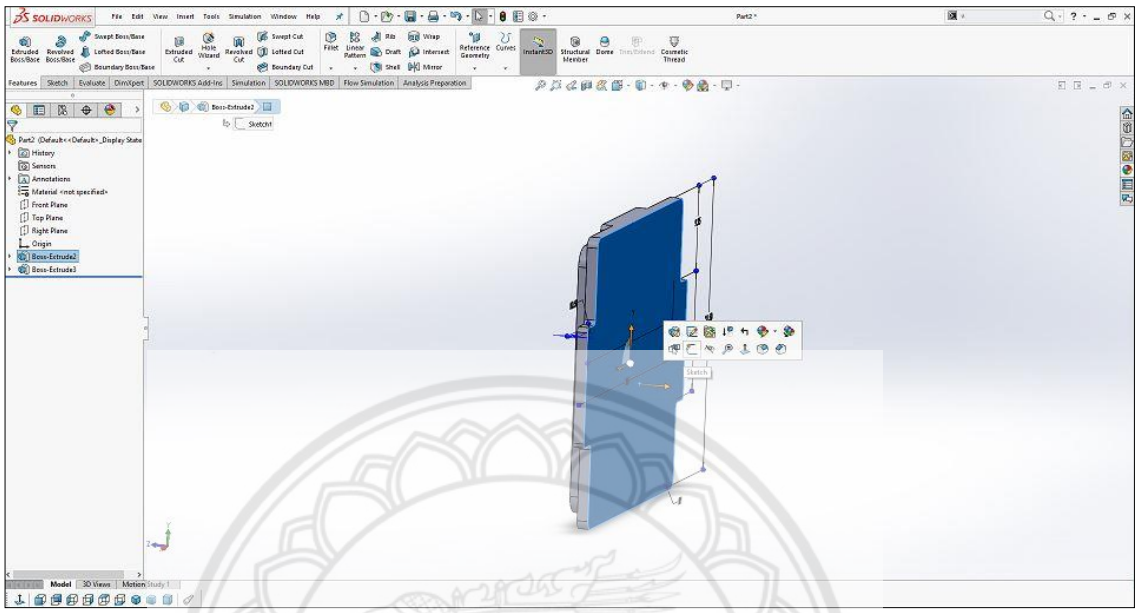
2.14 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



2.15 คลิก OK

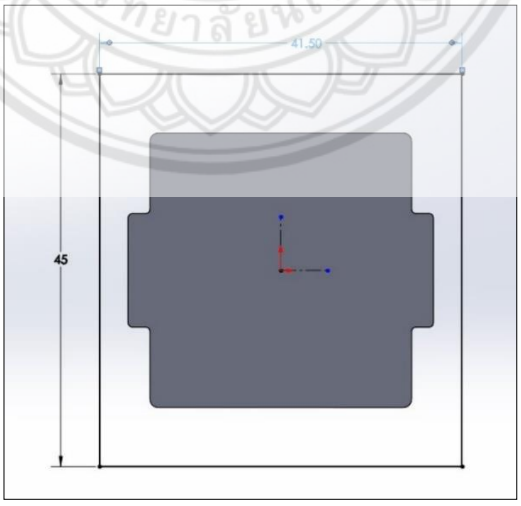


2.16 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหลังของ CPU แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



2.17 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

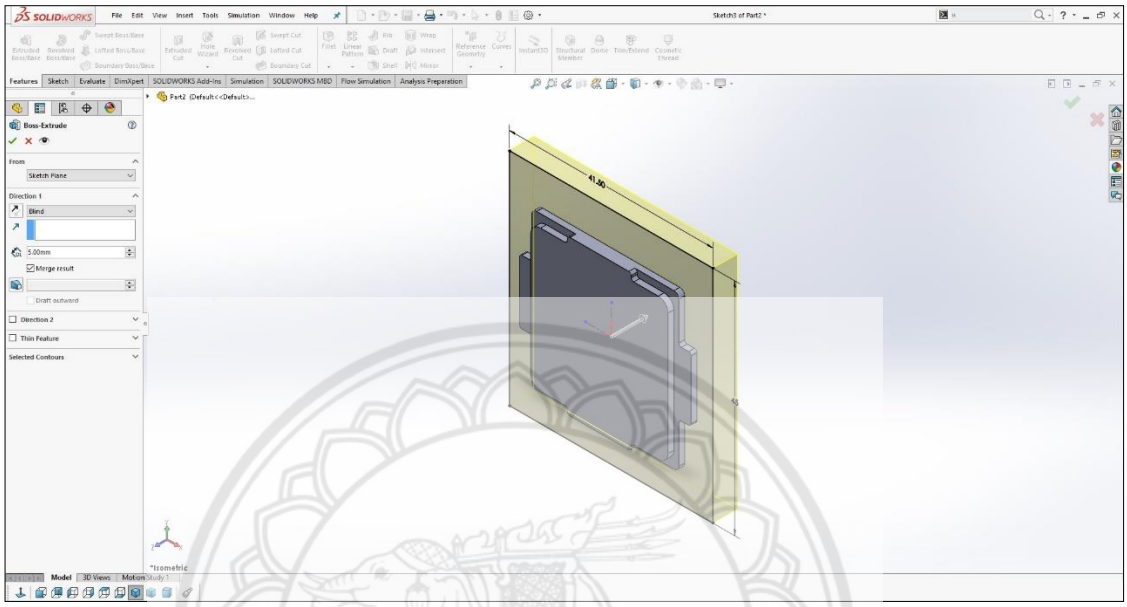
2.18 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 41.50 mm ยาว 45 mm



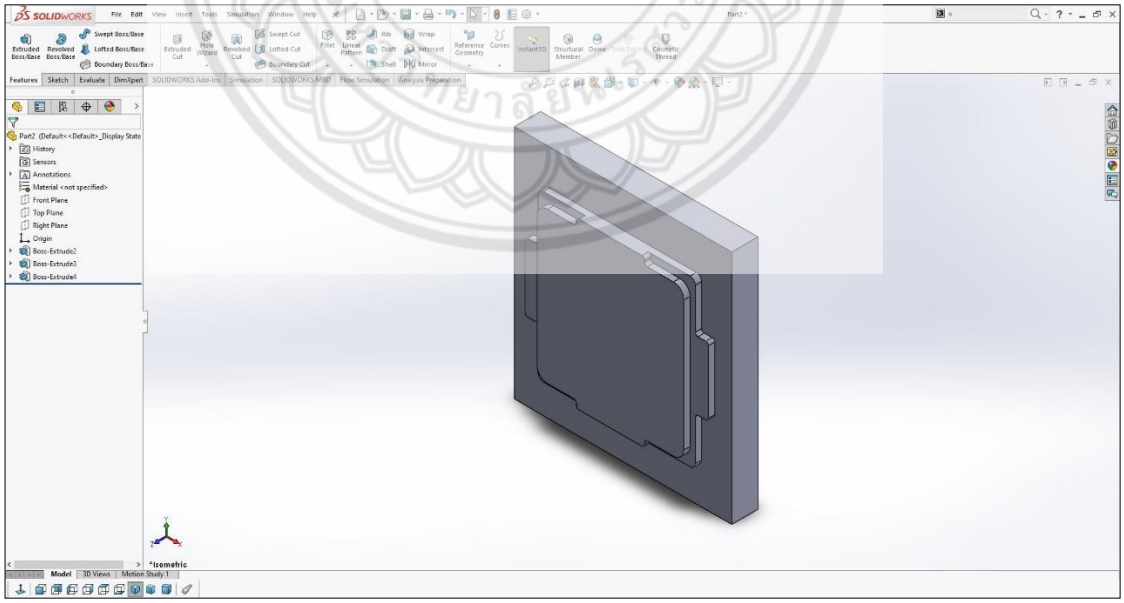
2.19 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

2.14 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 5 mm



2.15 คลิก OK

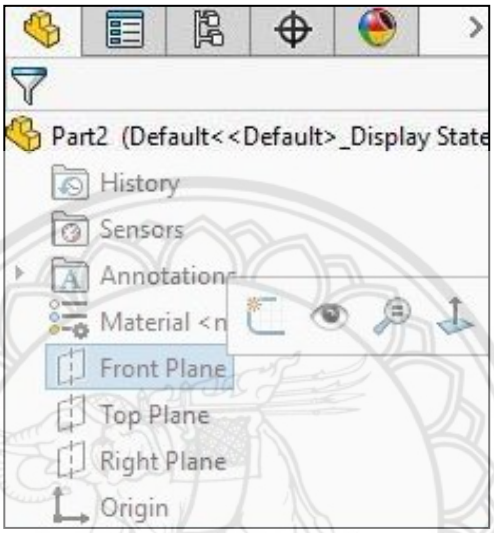


3. การสร้างผ้าจ่ายไฟของ CPU

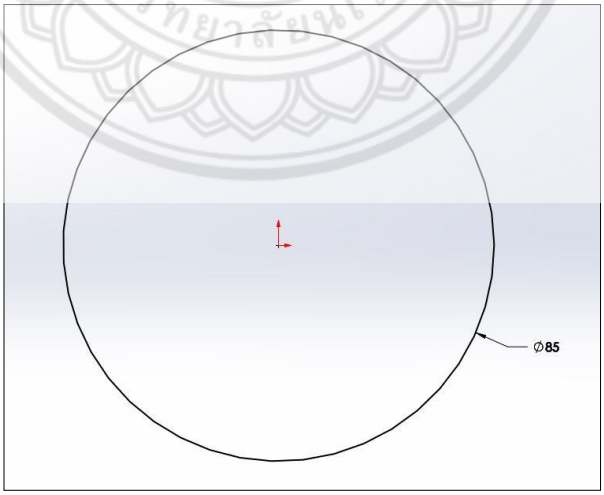
3.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

3.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

3.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



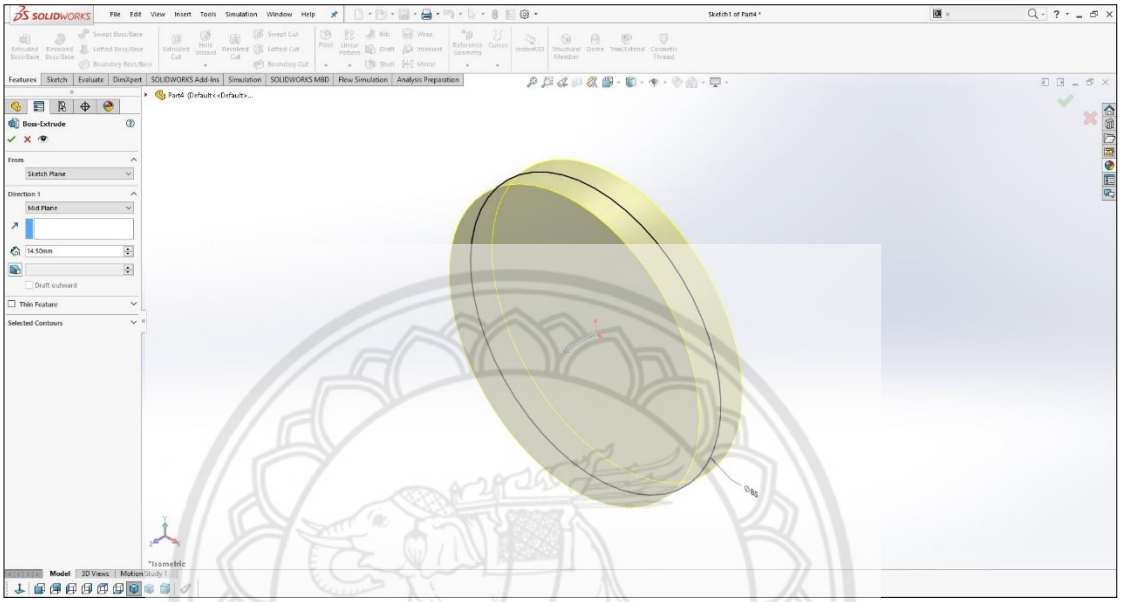
3.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนูและกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 85 mm



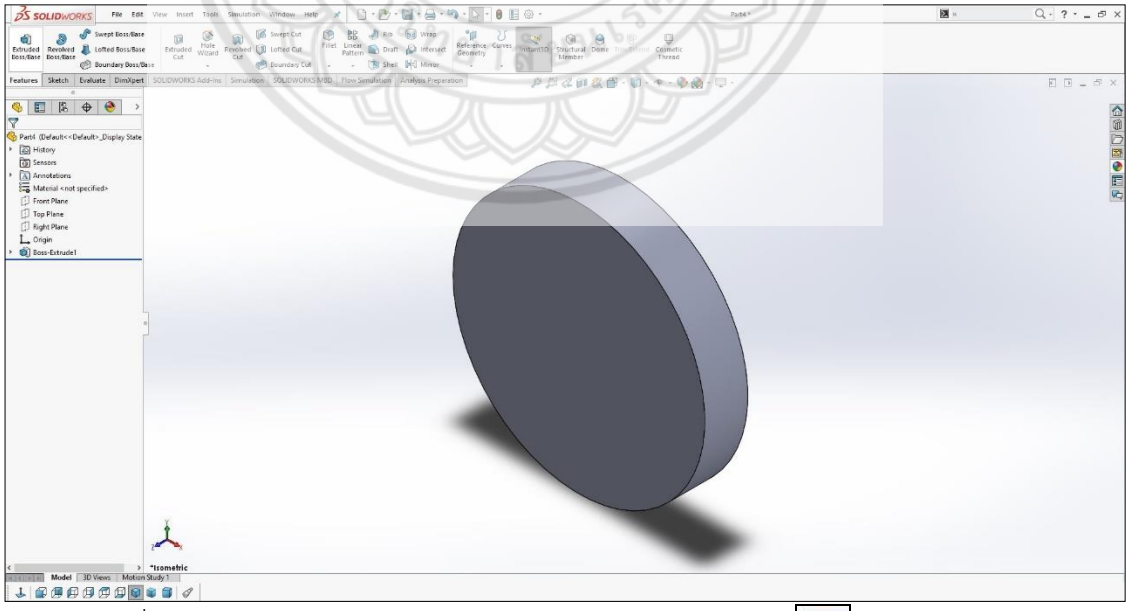
3.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

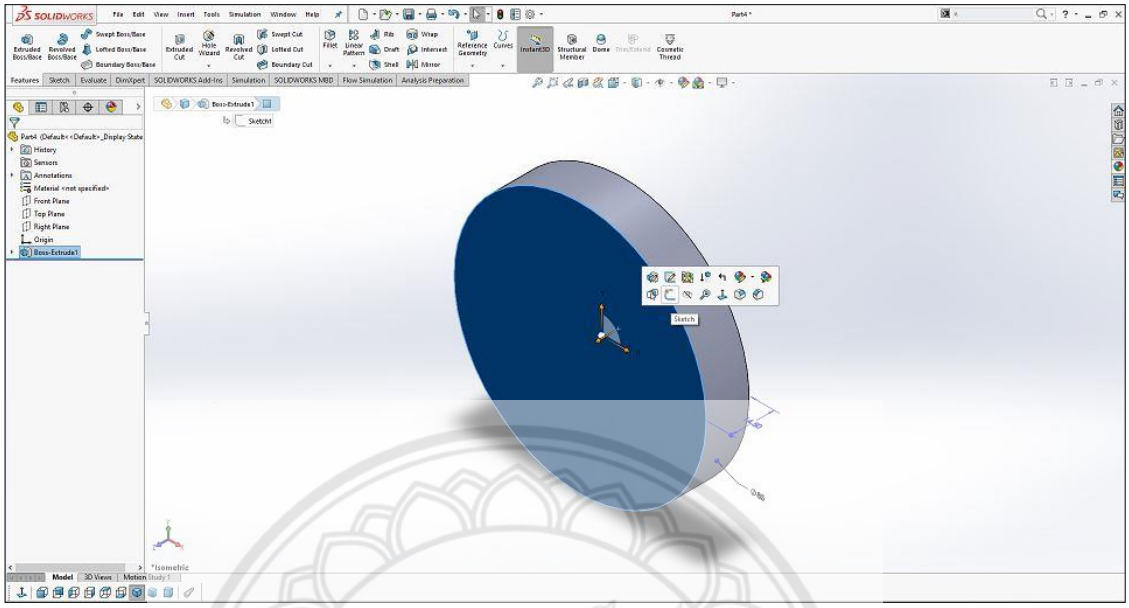
3.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 14.50 mm



3.8 คลิก OK

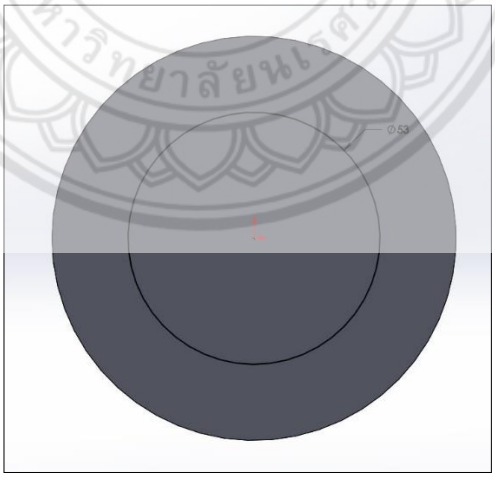


3.9 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



3.10 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

3.11 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนูและกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 53 mm

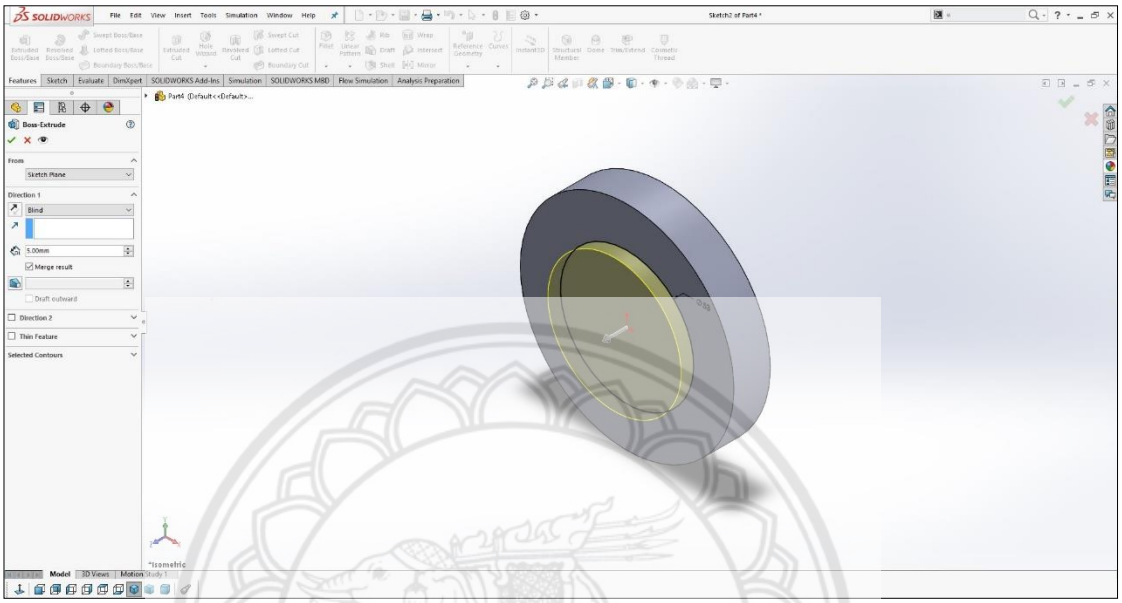


3.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

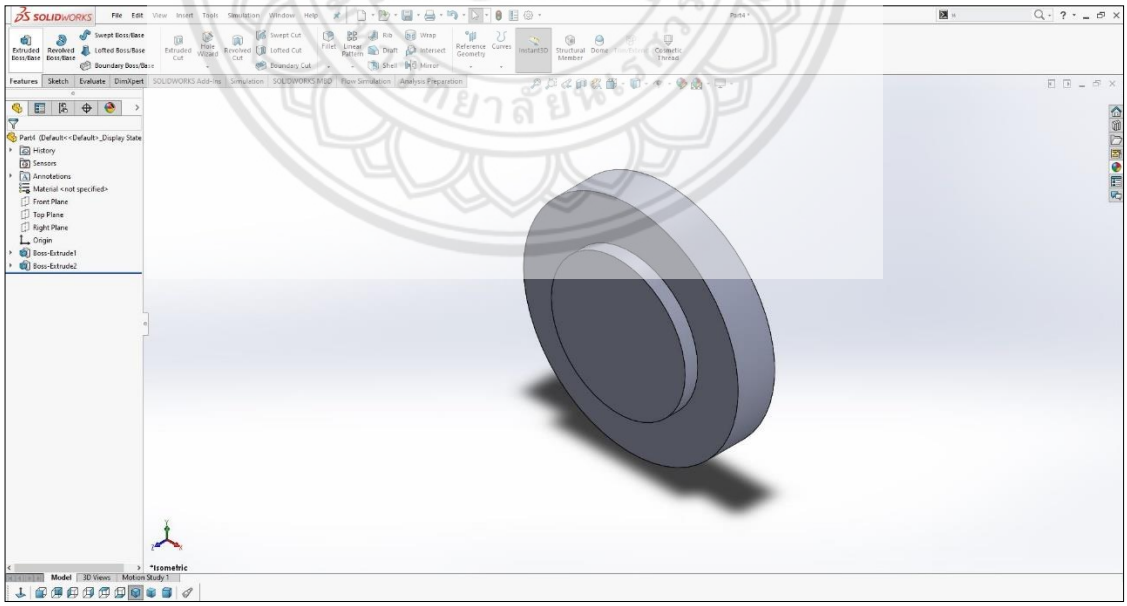
3.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

3.14 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded)

5 mm



3.15 คลิก OK



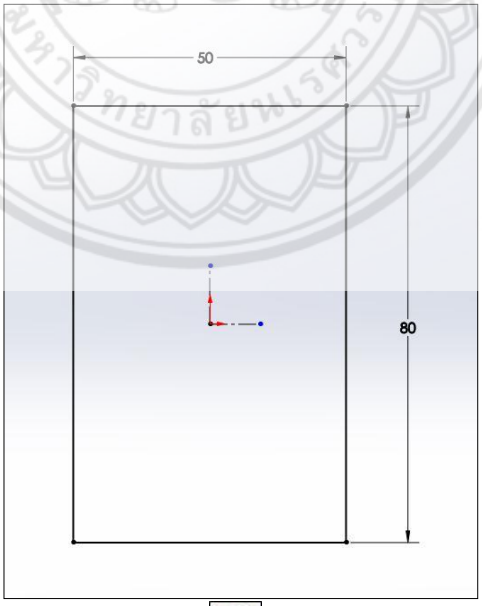
4. การสร้างผ้าจ่ายไฟขนาดใหญ่

4.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

4.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

4.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู

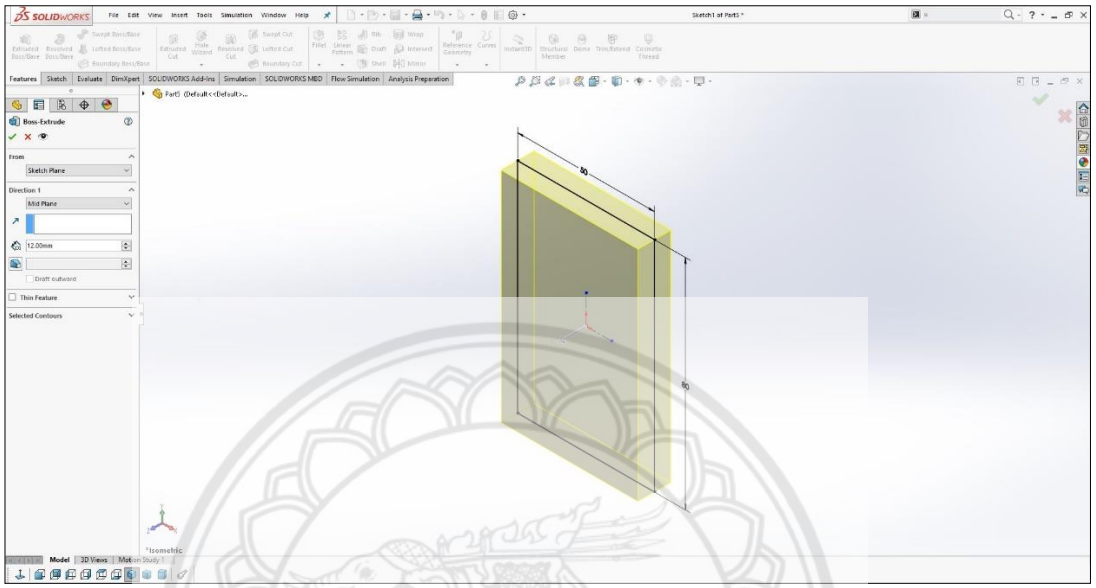
4.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 50 mm ยาว 80 mm



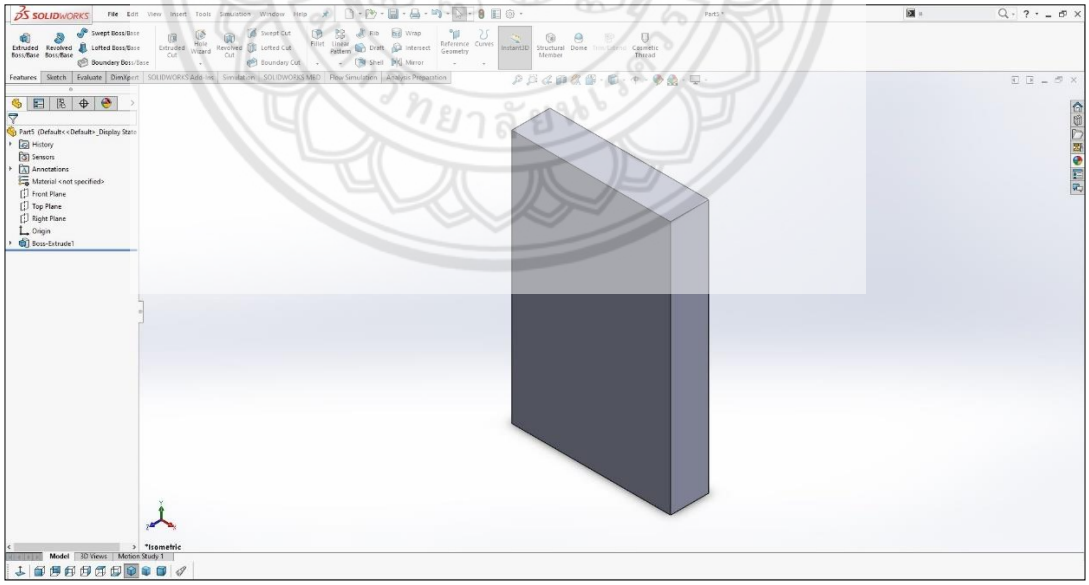
4.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

4.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

4.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 12 mm



4.8 คลิก OK

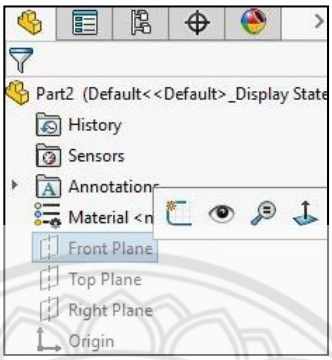


5. การสร้างผ้าจ่ายไฟขนาดกลาง

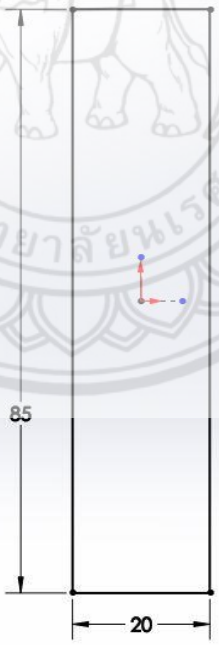
5.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

5.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

5.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



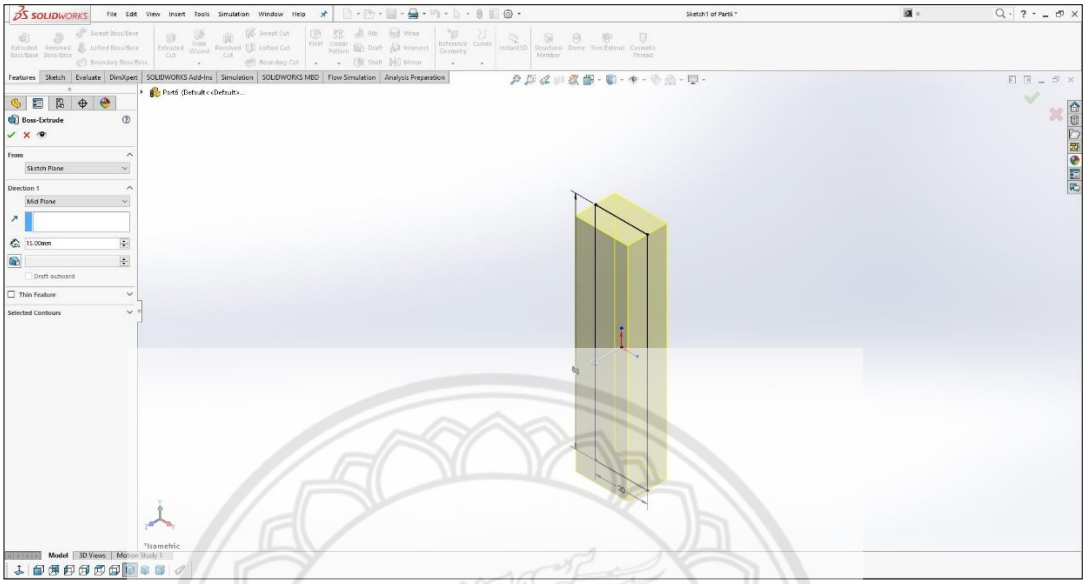
5.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 20 mm ยาว 85 mm



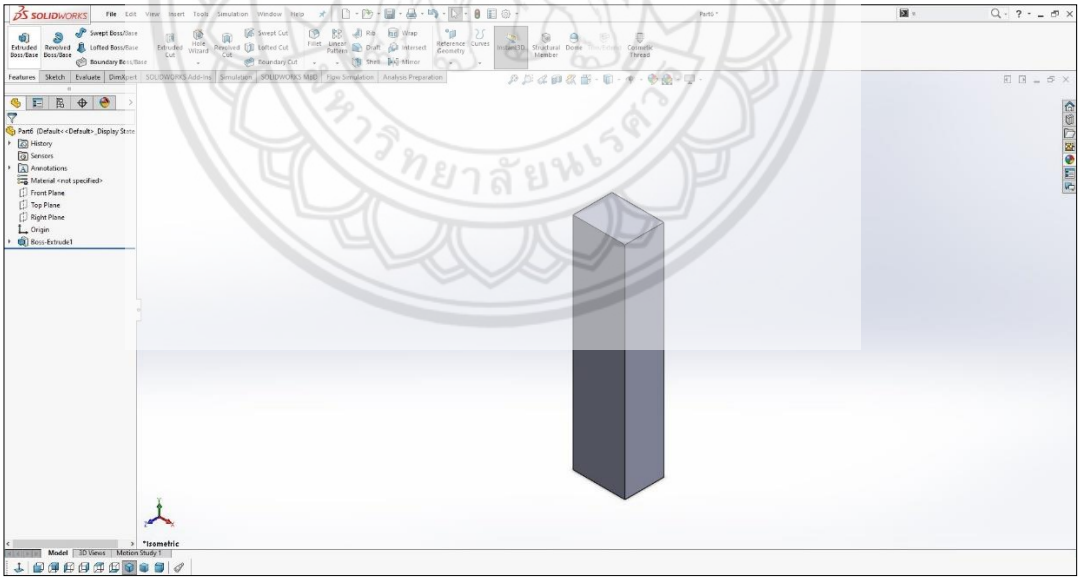
5.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

5.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

5.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 15 mm



5.8 คลิก OK

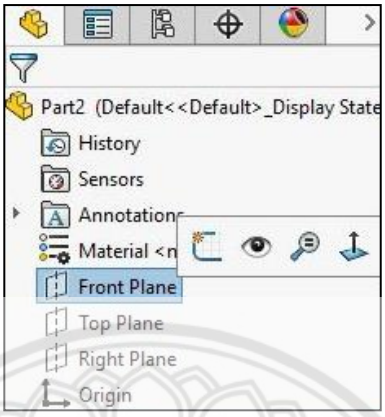


6. การสร้างผ้าจ่ายไฟขนาดเล็ก 10 ชิ้น

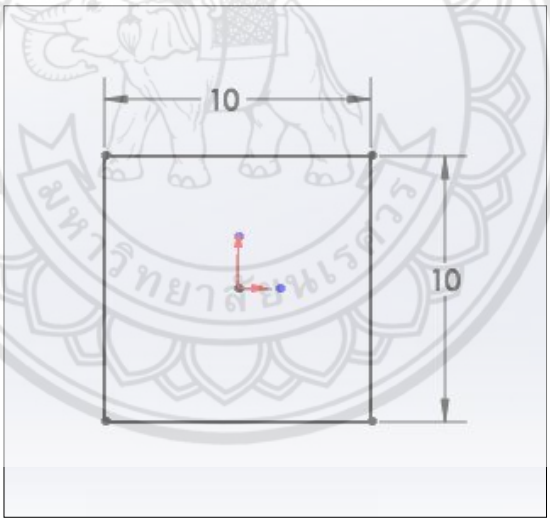
6.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

6.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

6.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



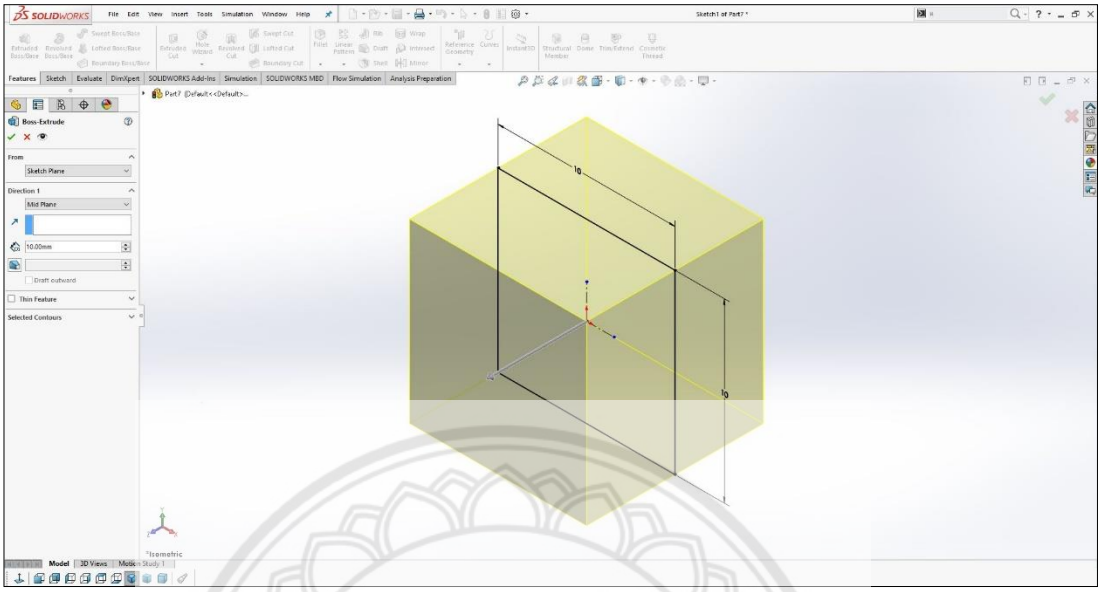
6.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 10 mm ยาว 10 mm



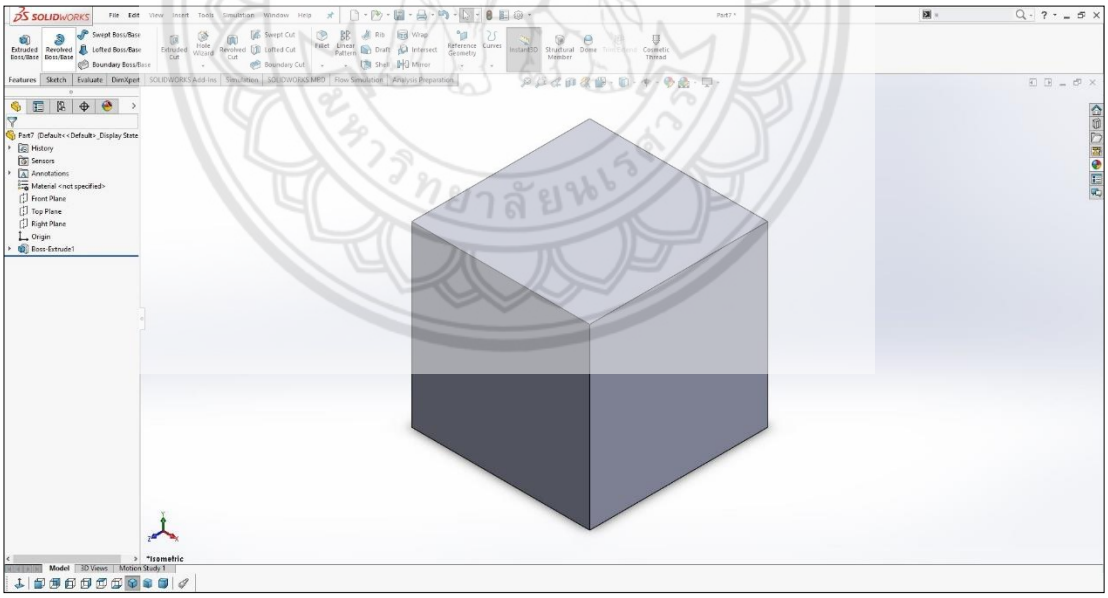
6.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

6.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

6.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 10 mm



6.8 คลิก OK

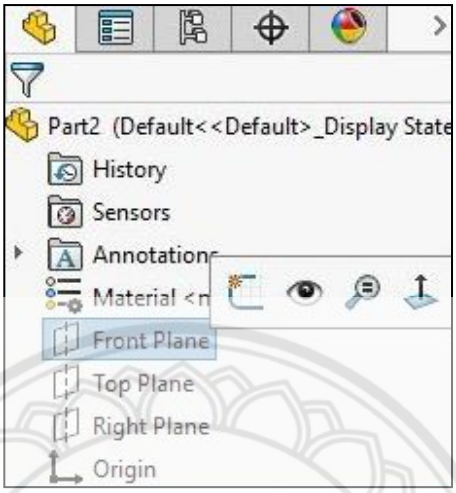


7. การสร้างผ้าจ่ายไฟของการ์ดจอ

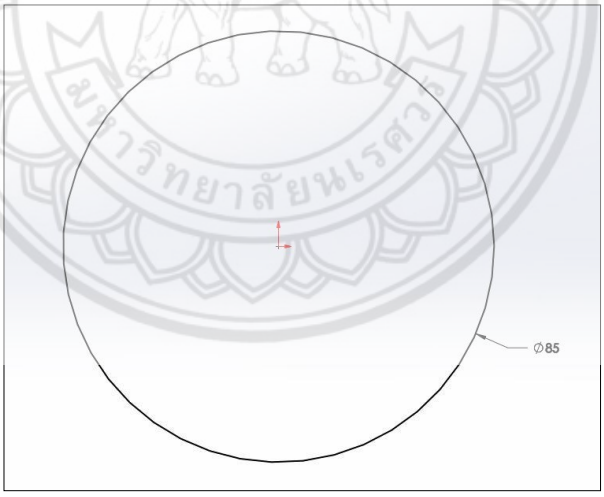
7.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

7.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

7.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



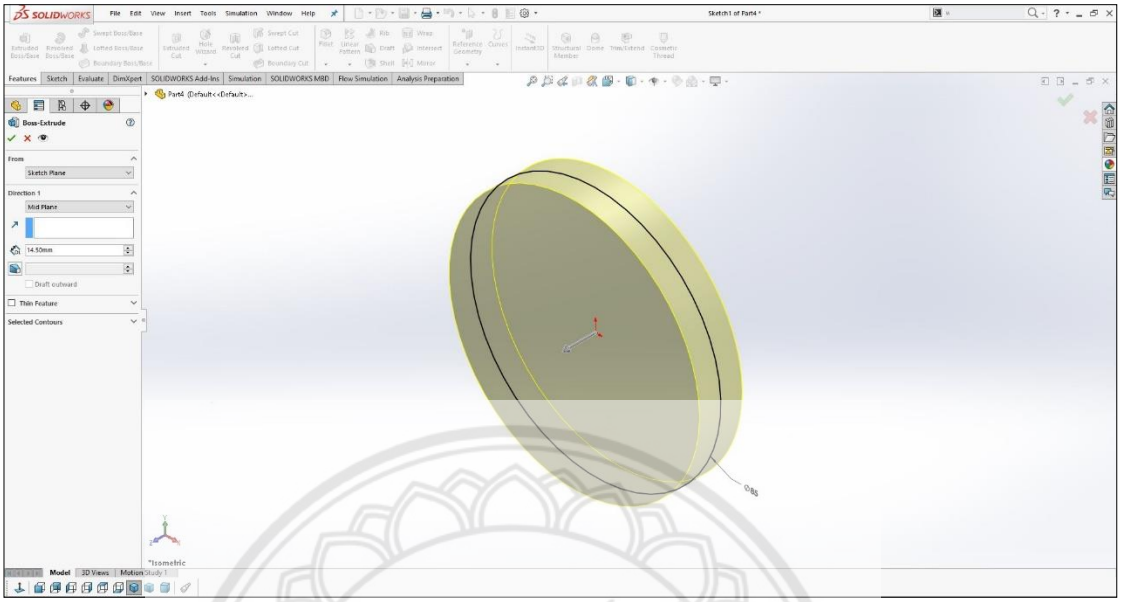
7.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนูและกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 85 mm



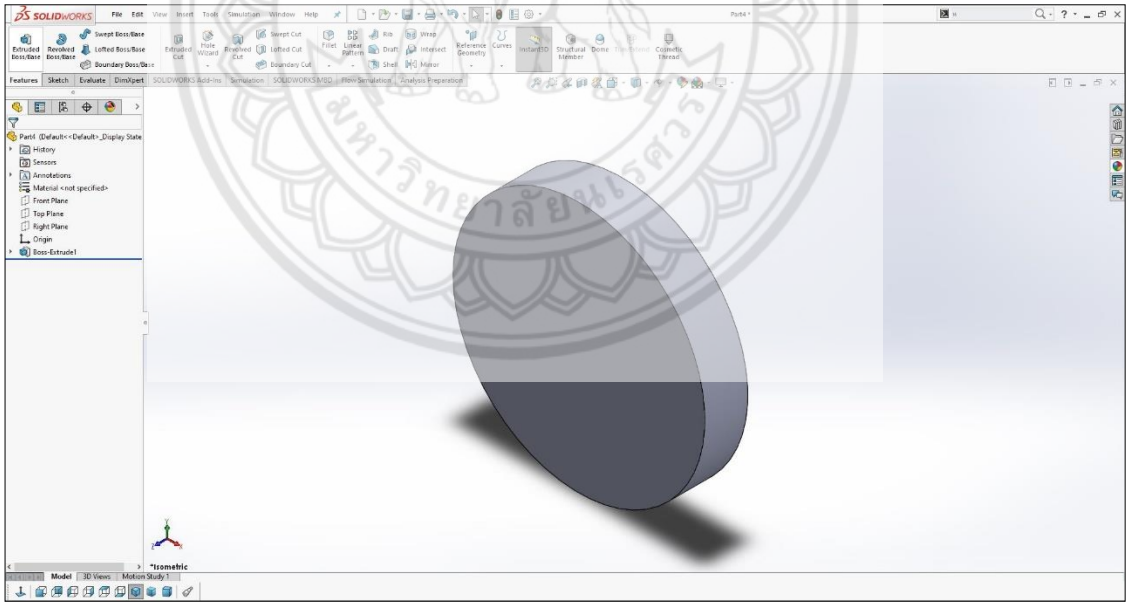
3.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

3.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 14.50 mm



3.8 คลิก OK

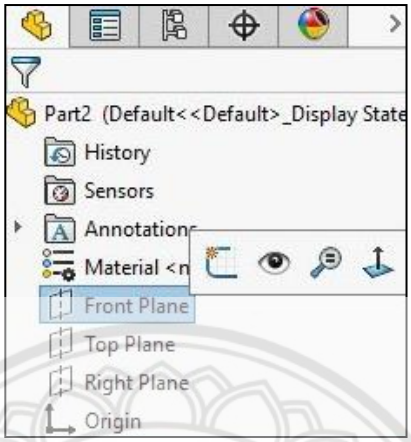


8. การสร้างแผ่น PCB ของการ์ดจอ

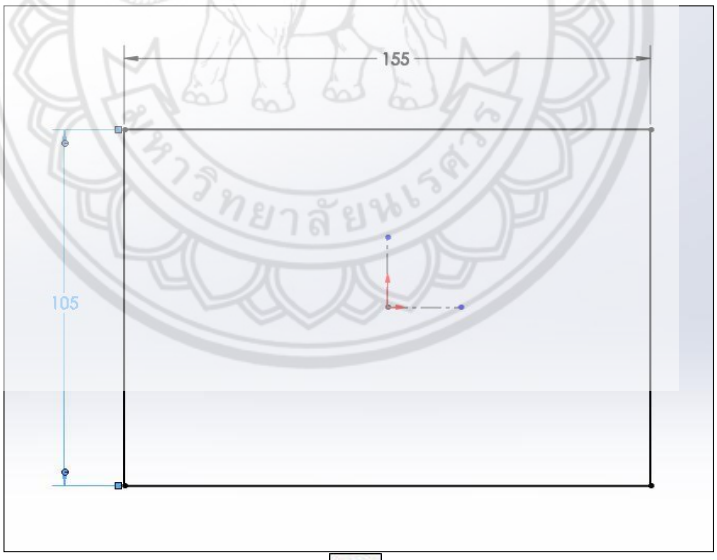
8.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

8.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

8.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



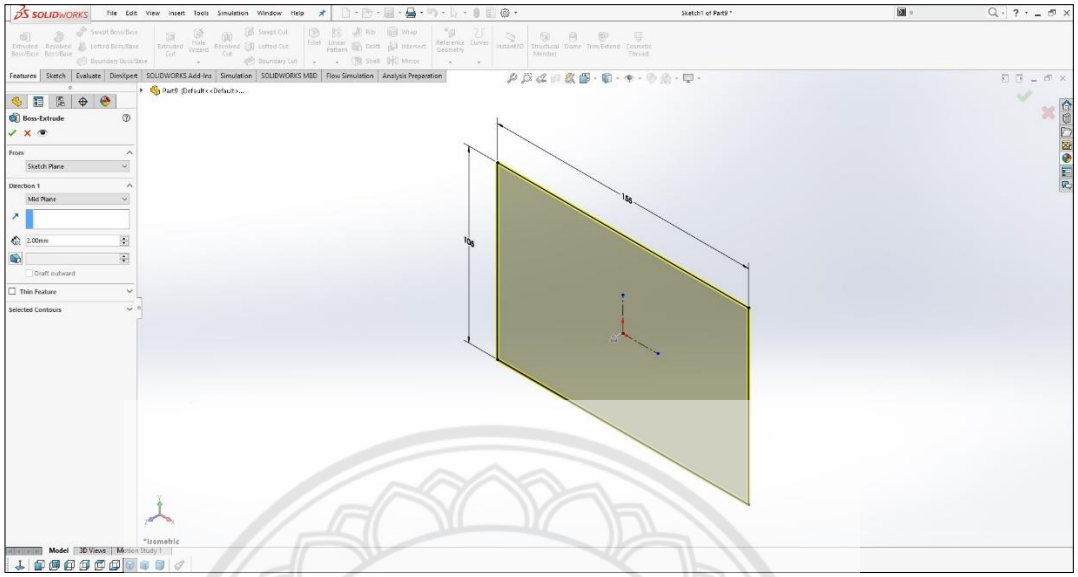
8.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 155 mm ยาว 105 mm



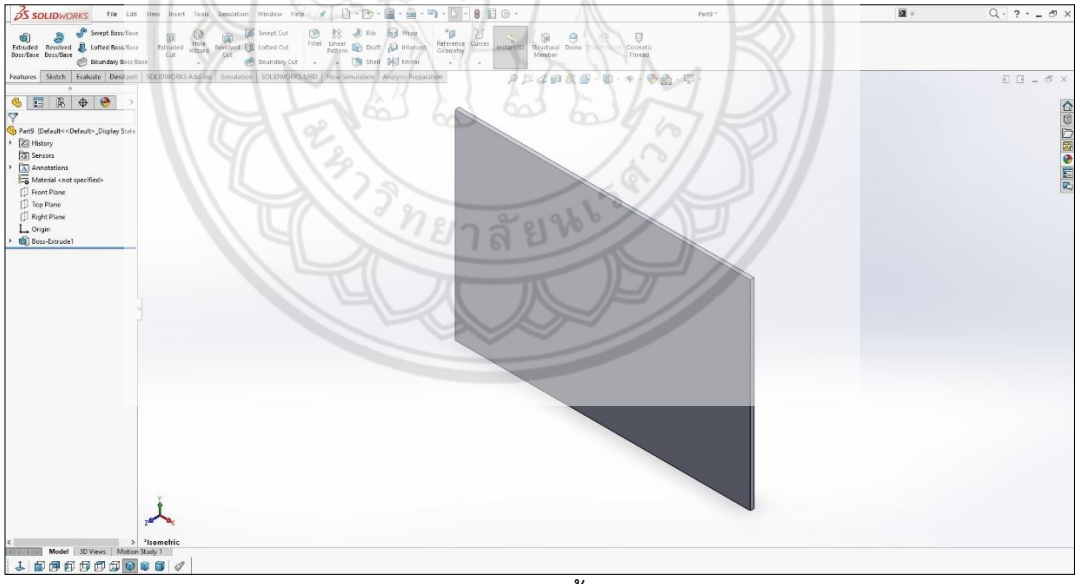
8.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

8.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

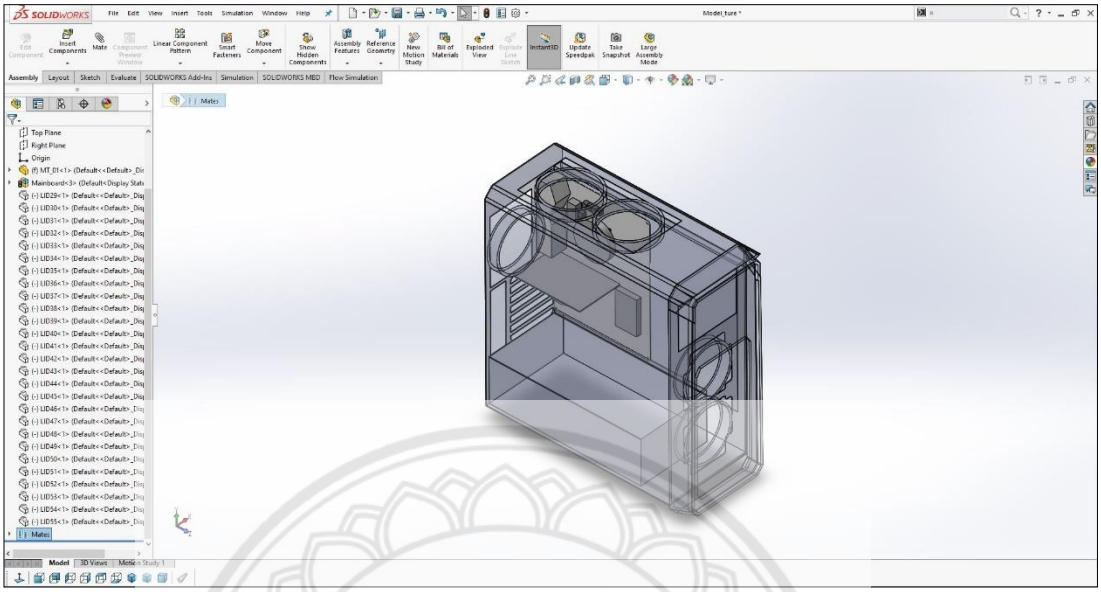
8.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 2 mm



8.8 คลิก OK



สร้างแบบจำลองโดยประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน


SOLIDWORKS
File Edit View Insert Tools Simulation Window Help
Assembly Layout Sketch Evaluate SOLIDWORKS Add-Ins Simulation SOLIDWORKS MBD Flow Simulation
Mates
Top Plane
Right Plane
Origin
Model 3D Views Motion Study 1

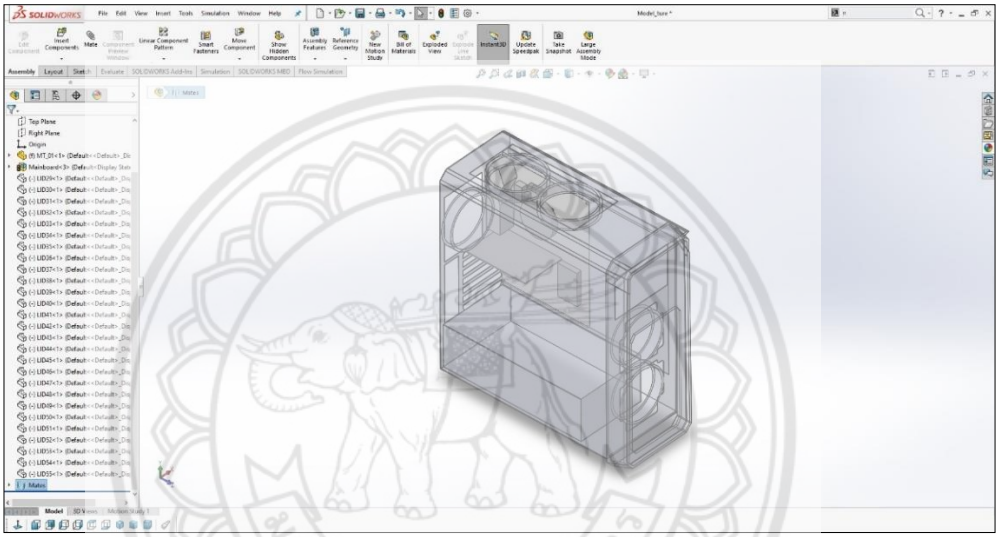
ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

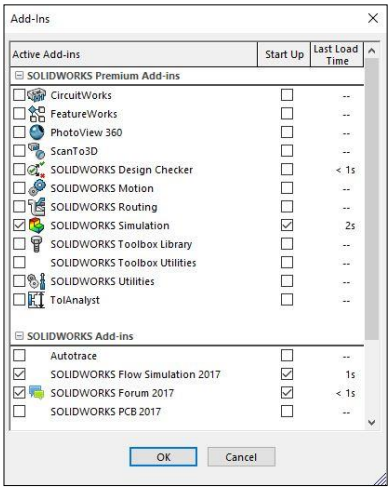
วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. เตรียมแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.1 เปิดไฟล์แบบจำลองขึ้นมา



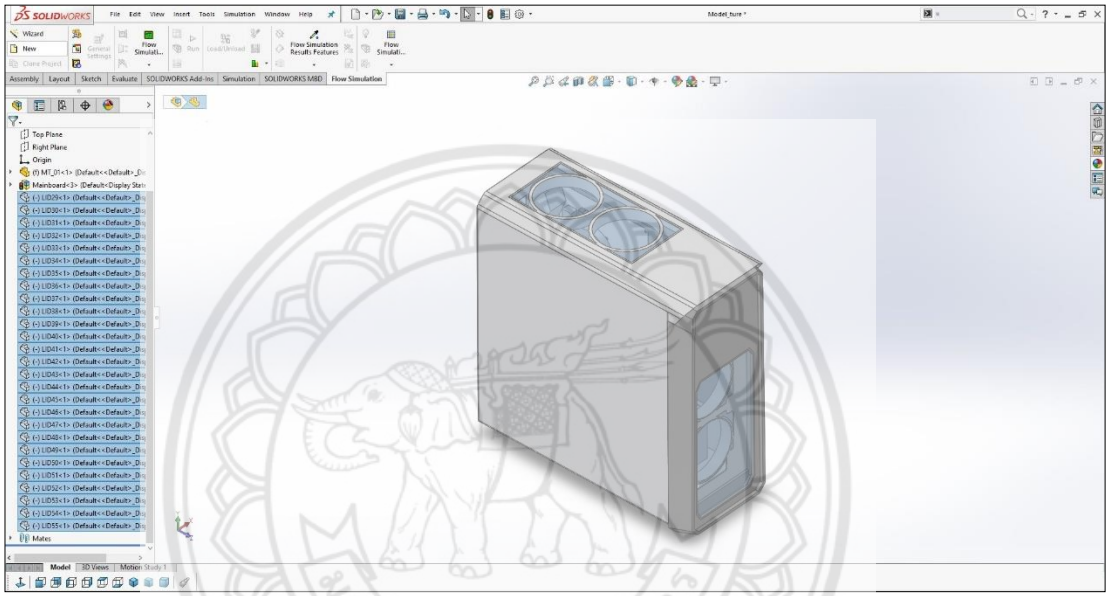
1.2 คลิกซ้ายที่ลูกศรด้านขวาของเฟือง จากนั้นเลือกคำสั่ง Add in Add-Ins... จะแสดงแถบ Tool Bar ชื่อว่า Add-Ins ขึ้นมา ให้เลือกเช็คถูกทั้งด้านหน้าและด้านหลังของ Solidworks Flow Simulation 2017 จากนั้นกด OK



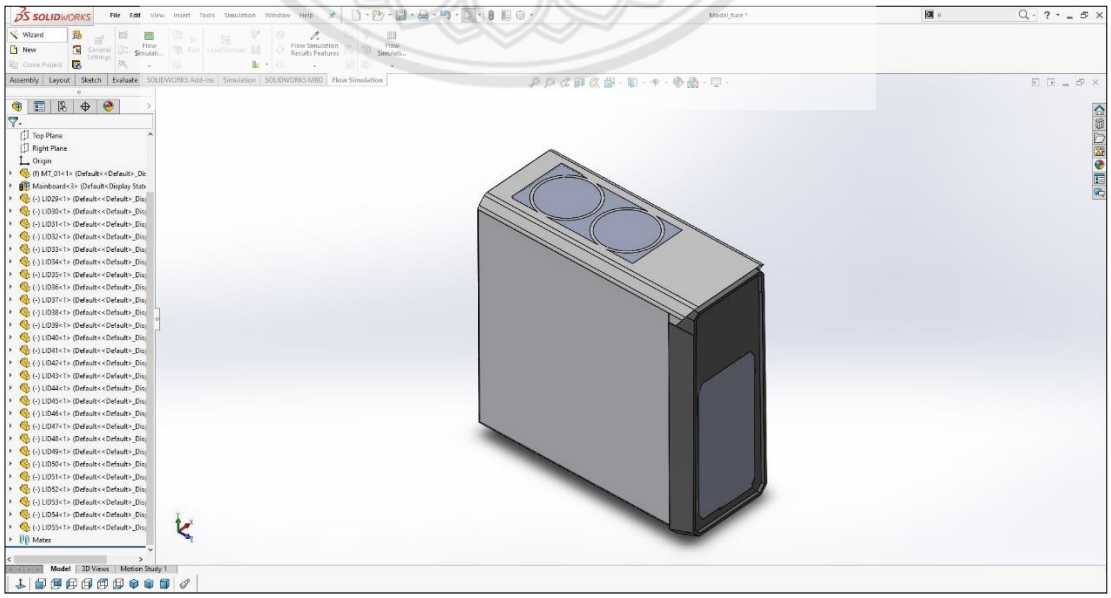
2. สร้าง Lids ที่ช่องที่ของไหลสามารถไหลผ่านได้

2.1 คลิก Flow Simulation เลือกคำสั่ง Create lids เพื่อปิดทางเข้าและออกของของไหลทั้งหมด

2.2 เลือกพื้นที่ที่เป็นทางเข้าและออกของของไหล



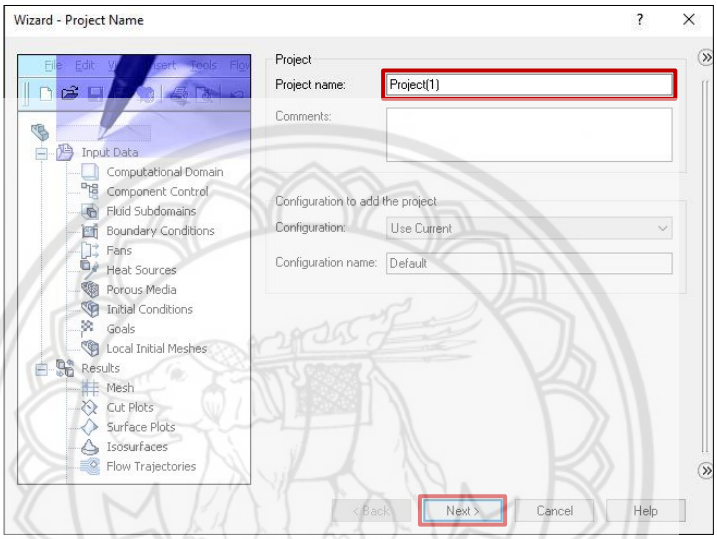
2.3 คลิก OK



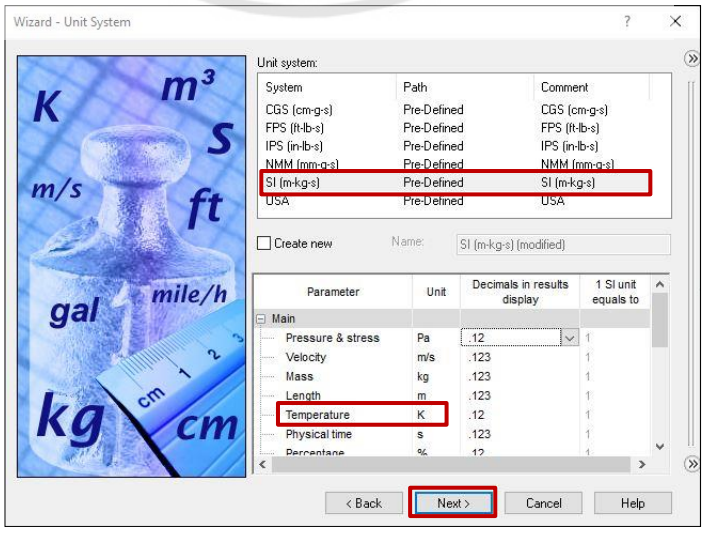
3. กำหนดคุณสมบัติของของไหลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 เลือกคำสั่ง Wizard

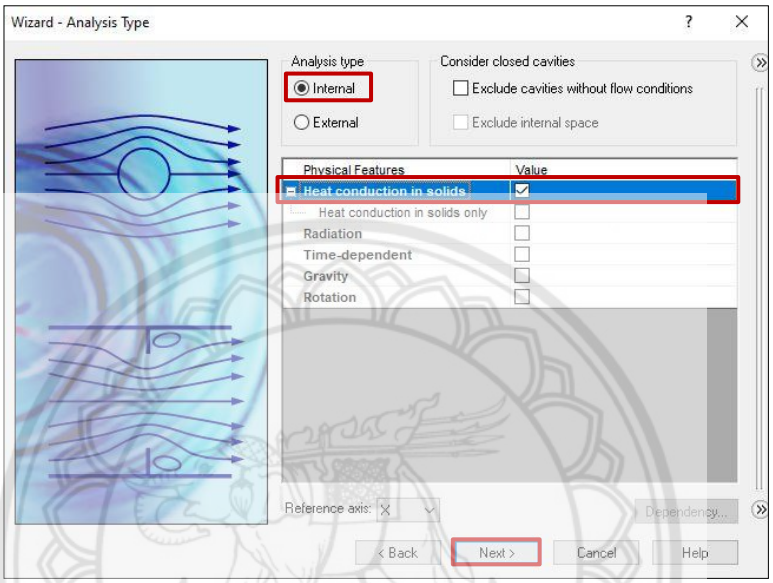
3.2 จะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Project Name ขึ้นมา จากนั้นให้ทำการตั้งชื่อ Project แล้วคลิก Next



3.3 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Unit System ขึ้นมา ให้ทำการกำหนดระบบหน่วยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (เลือกระบบ SI) และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ (จาก K เป็น ^{o}C) แล้วคลิก Next

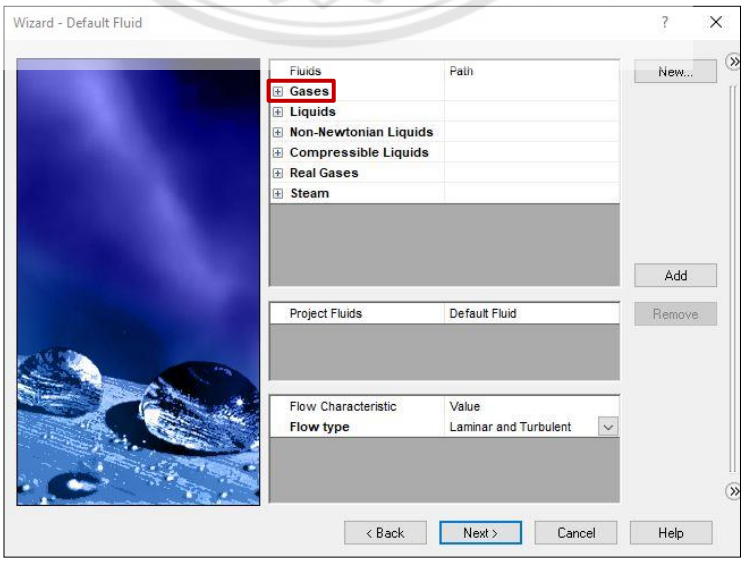


3.4 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Analysis Type ขึ้นมา ให้เลือกรูปแบบการไหลเป็นแบบการไหลภายใน Internal และการคำนวณให้เลือก Heat conduction in solid แล้วคลิก Next

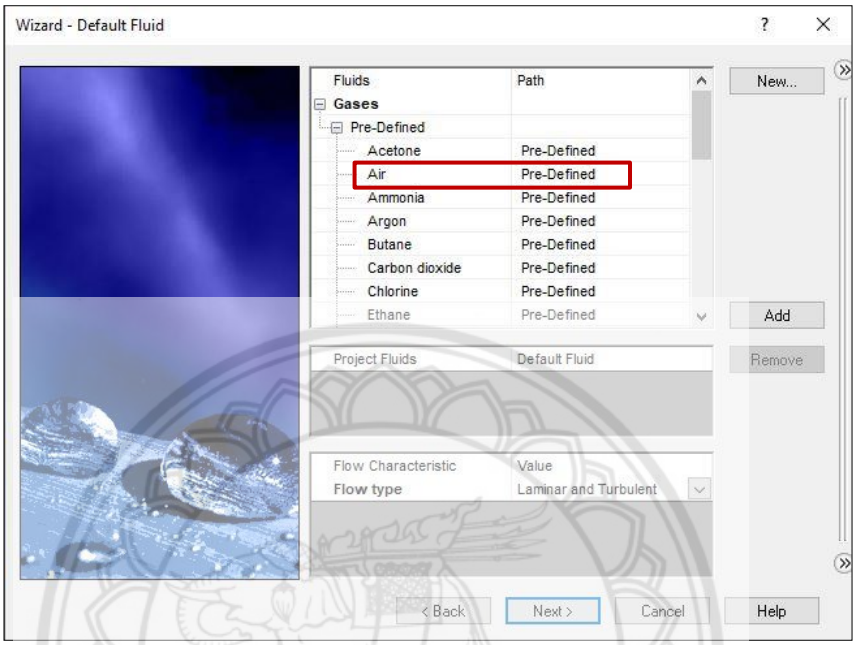


3.5 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Default Fluid ขึ้นมา กำหนดชนิดของของไหล (ในกรณีศึกษานี้ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน)

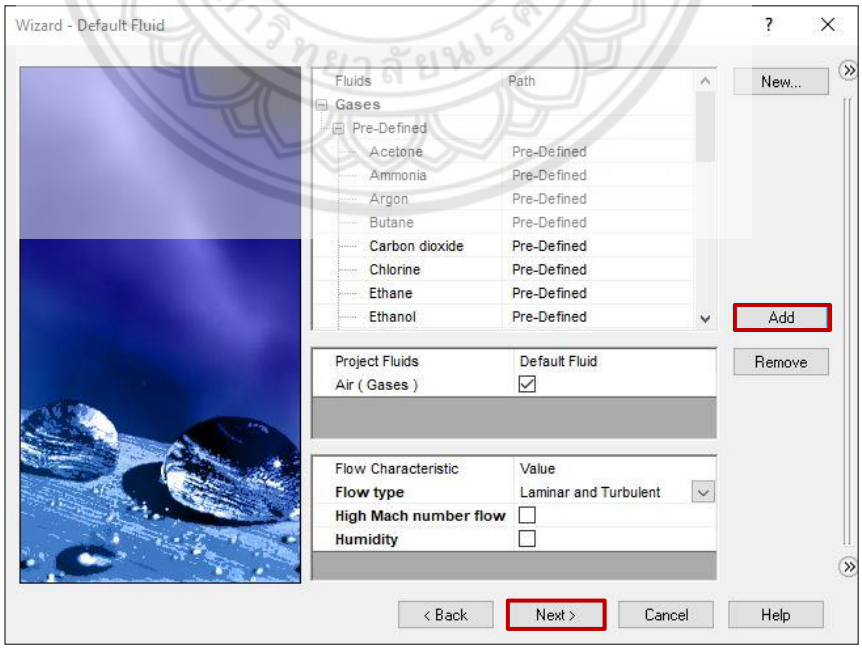
3.5.1 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Gases



3.5.2 เลือก Air

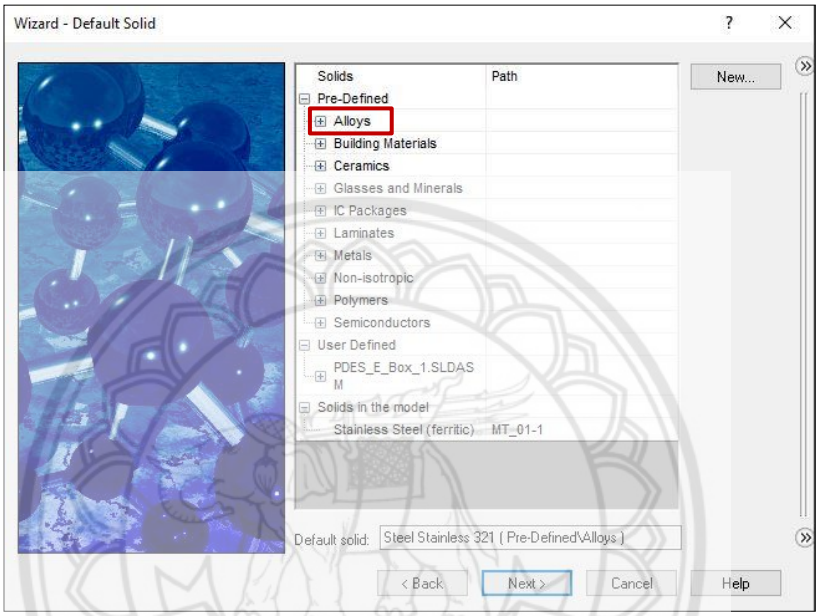


3.5.3 คลิก Add แล้วคลิก Next

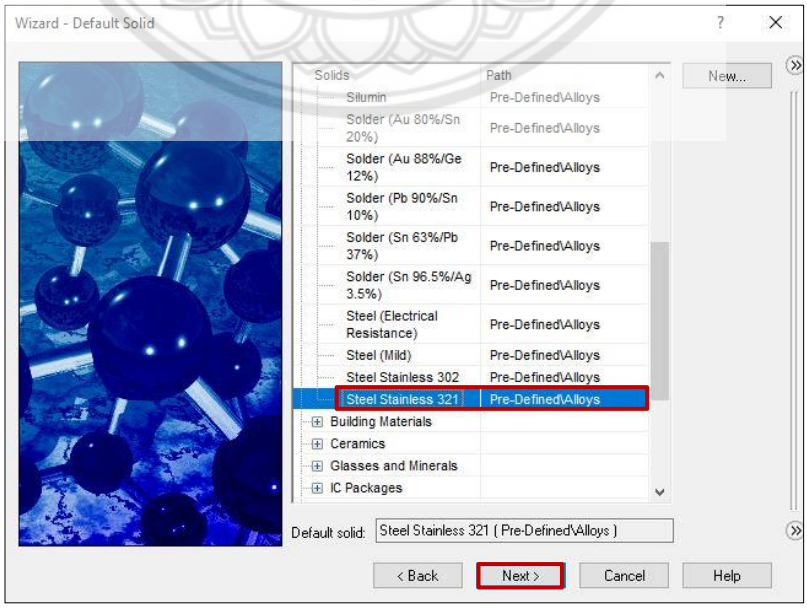


3.6 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Default Solid ขึ้นมา กำหนด Material ของแบบจำลอง (กรณีศึกษานี้ใช้ Steel Stainless 321)

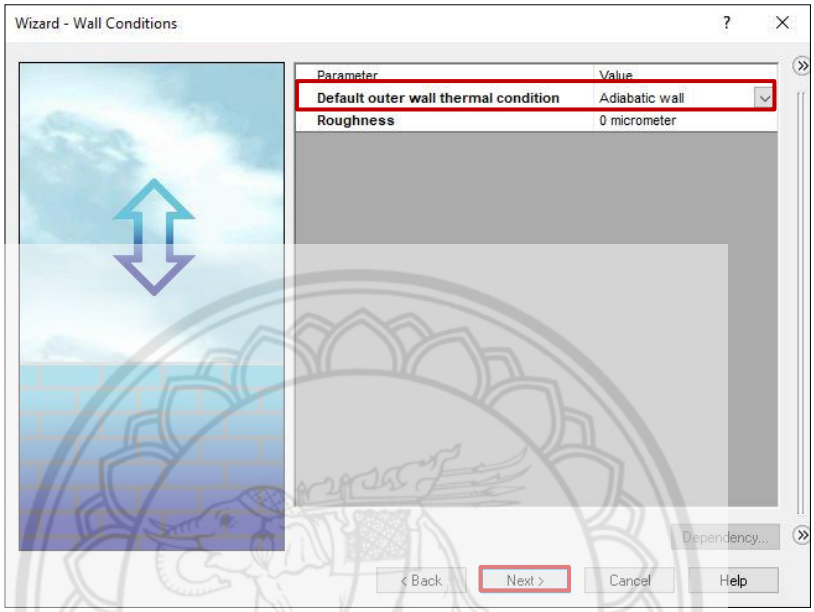
3.6.1 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Alloys



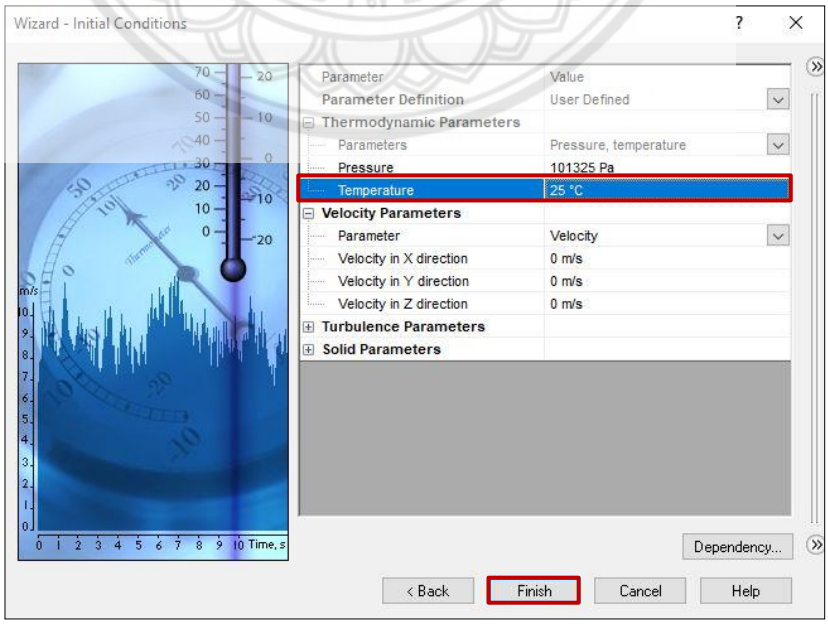
3.6.2 เลือก Steel Stainless 321 แล้วคลิก Next



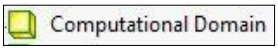
3.7 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Wall Condition ขึ้นมา กำหนดพื้นผิวของเคสเป็นแบบ Adiabatic Wall แล้วคลิก Next

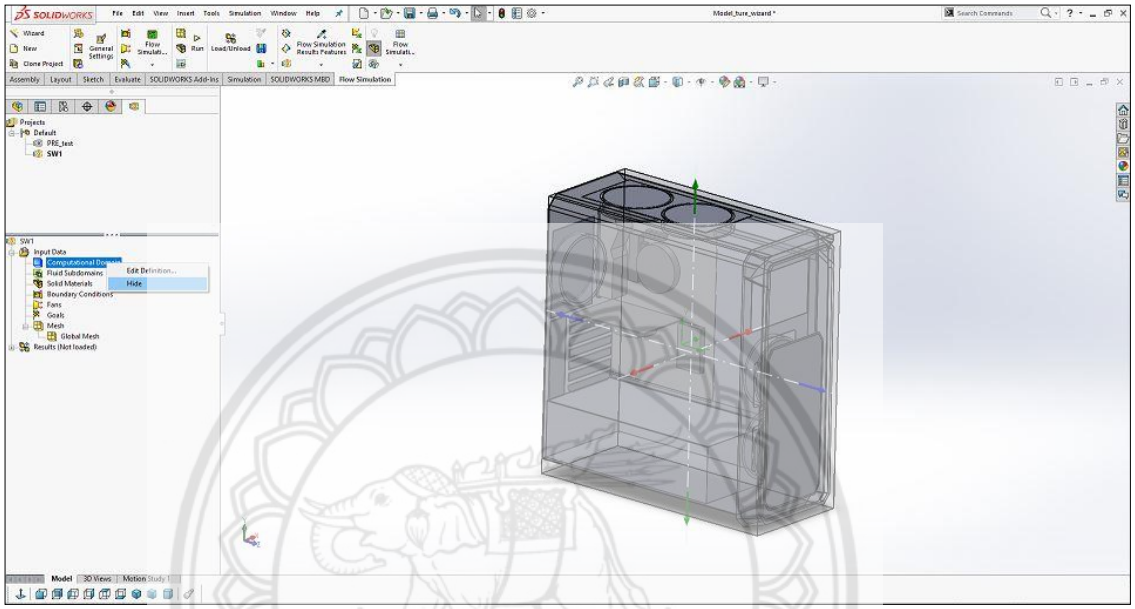


3.8 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Initial Conditions ขึ้นมา กำหนดอุณหภูมิภายนอก (เปลี่ยนจาก 20°C เป็น 25°C) แล้วคลิก Finish

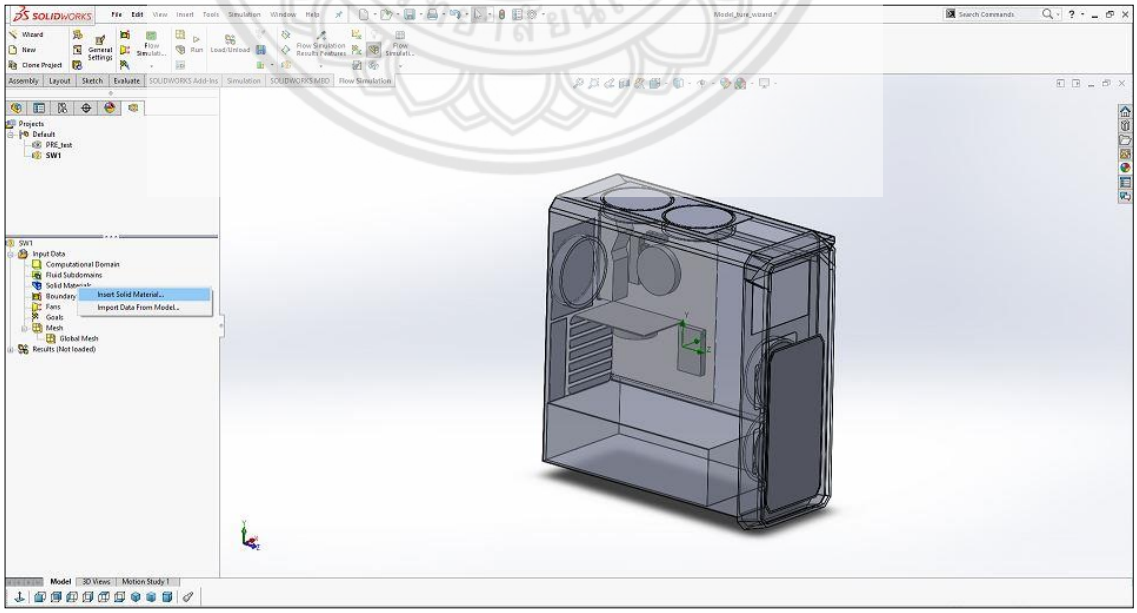


4. กำหนด Material ให้แก่ชิ้นส่วนที่เกิดความร้อน

4.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Computational Domain  เลือก Hide

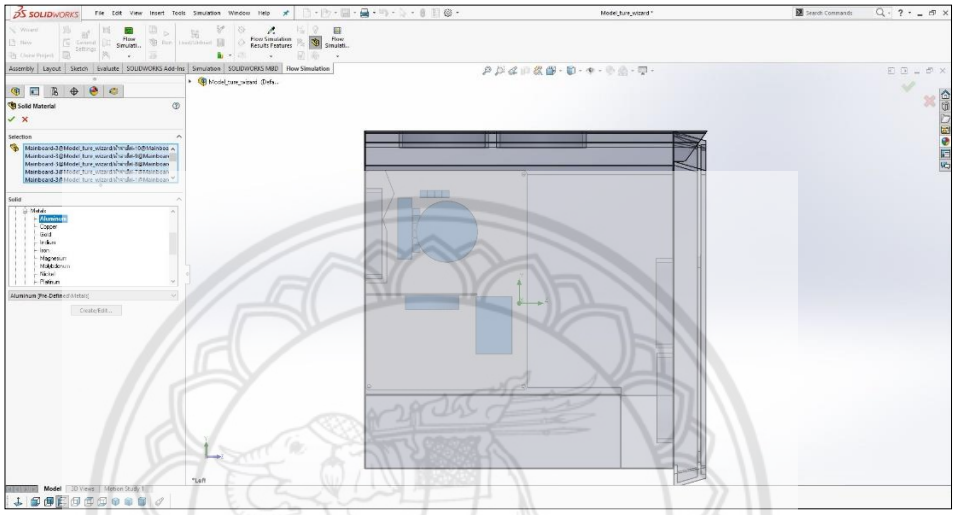


4.2 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material เลือก Insert Solid Material



4.3 คลิกเลือกผ้าจ่ายไฟทั้งหมด (มีผ้าจ่ายไฟของ CPU 1 ชิ้น มีผ้าจ่ายไฟของการ์ดจอ 1 ชิ้น มีผ้าจ่ายไฟขนาดเล็ก 10 ชิ้น มีผ้าจ่ายไฟขนาดกลาง 1 ชิ้น มีผ้าจ่ายไฟขนาดใหญ่ 1 ชิ้น)

4.4 เลือก Material (กรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น Aluminum)



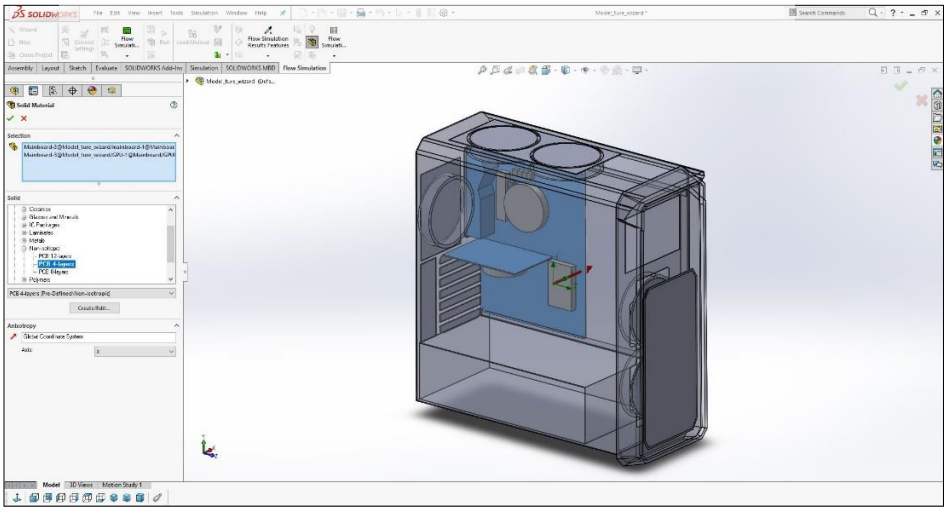
4.5 คลิก OK

4.6 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material

เลือก Insert Solid Material

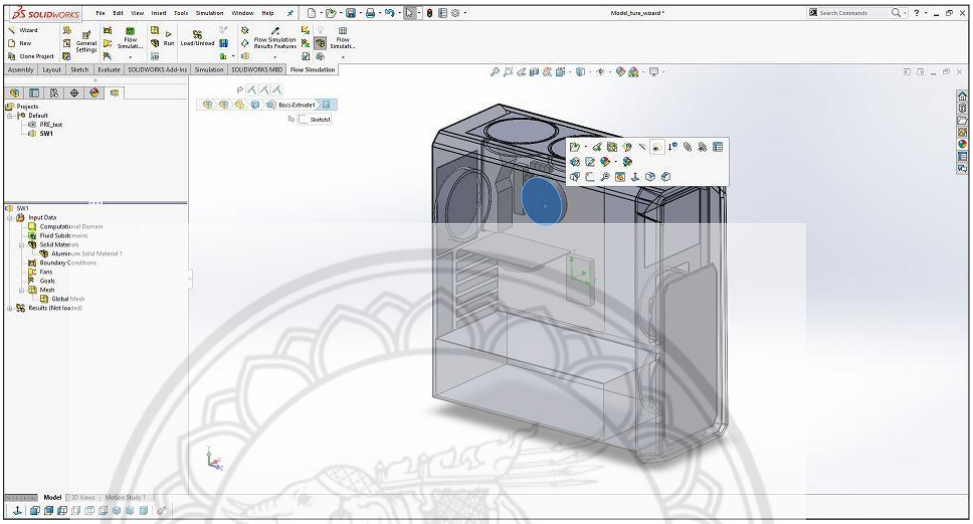
4.7 คลิกเลือกแผ่นบอร์ดทั้งหมด (มีแผ่นบอร์ดของ CPU 1 ชิ้น มีแผ่นบอร์ดของการ์ดจอ 1 ชิ้น)

4.8 เลือก Material (กรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น PCB-4 layer)



4.9 คลิก OK

4.10 คลิกเลือกผ้าจ่ายไฟของ CPU แล้วเลือกคำสั่ง Change Transparency

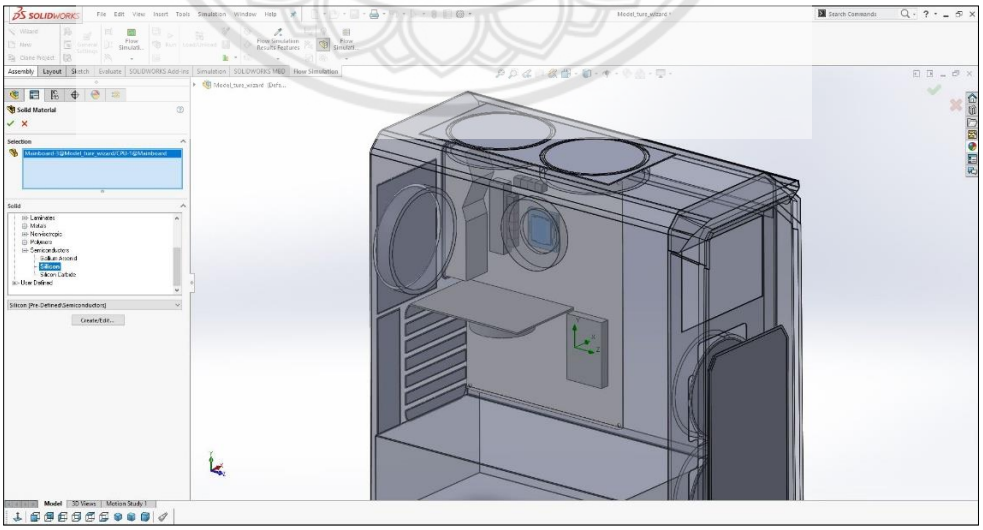


4.6 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material

เลือก Insert Solid Material

4.7 คลิกเลือก CPU ทั้งหมด (มีชิ้นส่วนของ CPU 1 ชิ้น)

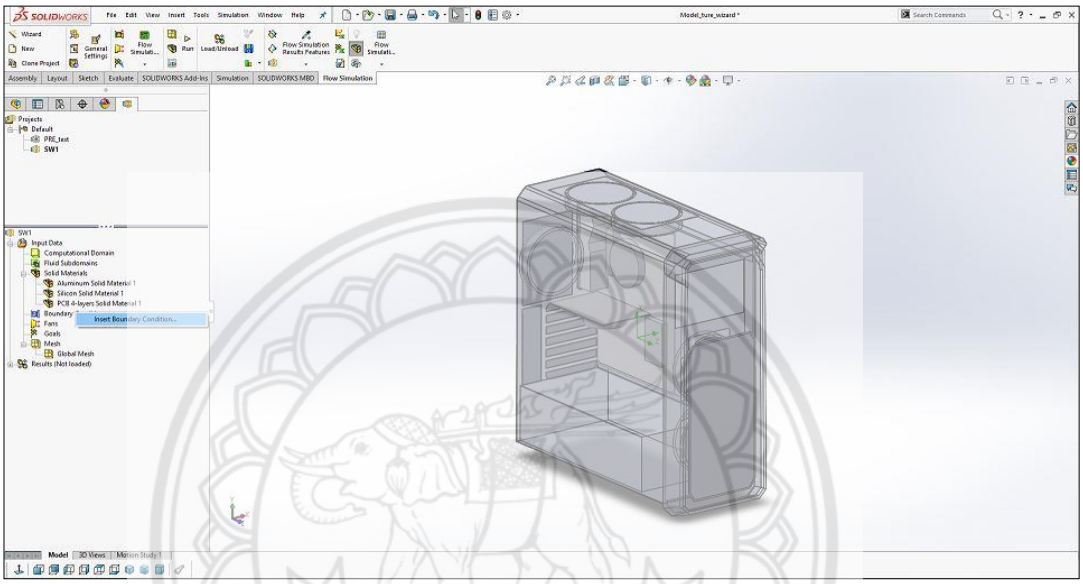
4.8 เลือก Material (กรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น Silicon)



4.9 คลิก OK

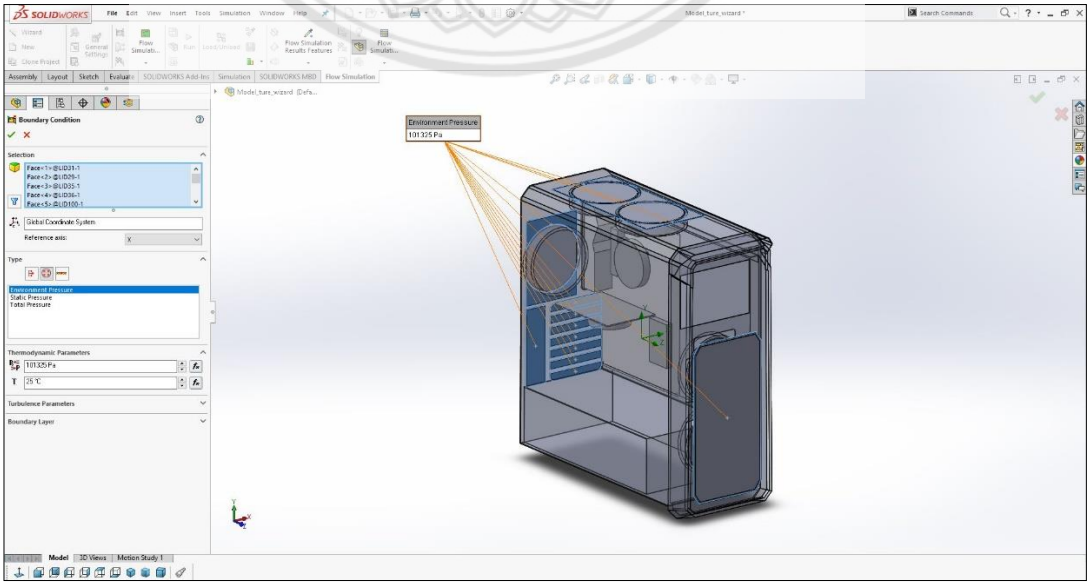
5. การกำหนดช่องของของไหลไหลผ่านอิสระ

5.1 คลิกขขาที่คำสั่ง Boundary Conditions เลือก Insert Boundary Condition

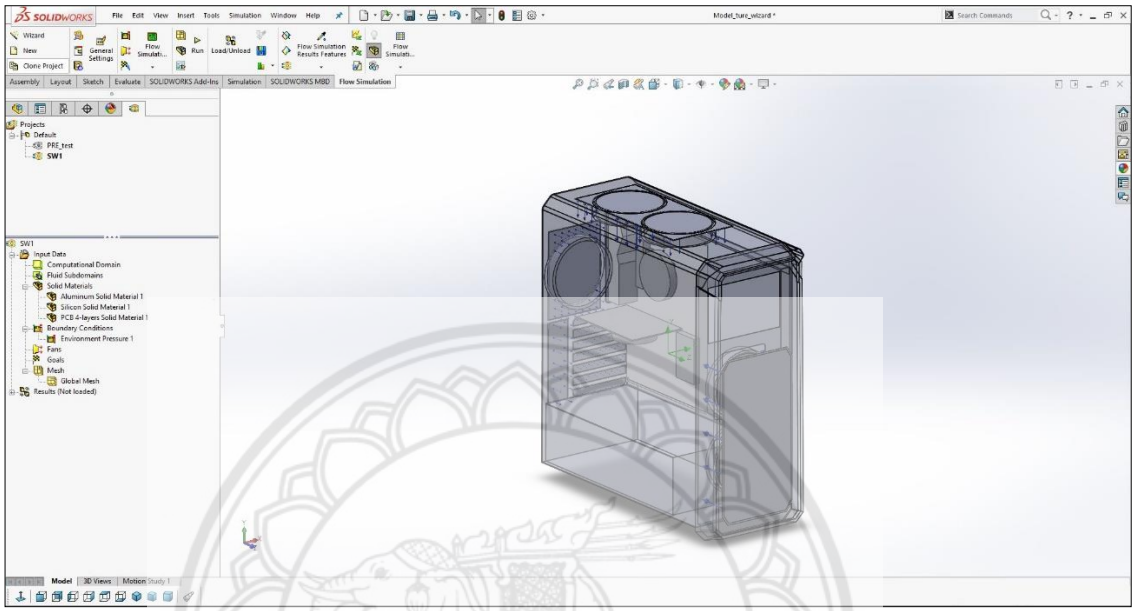


5.2 คลิกเลือกคำสั่ง Pressure Openings

5.3 คลิกเลือก Lids ที่เป็นช่องว่างของของไหลทั้งหมด ให้ทำการคลิกบริเวณภายในของ Lids

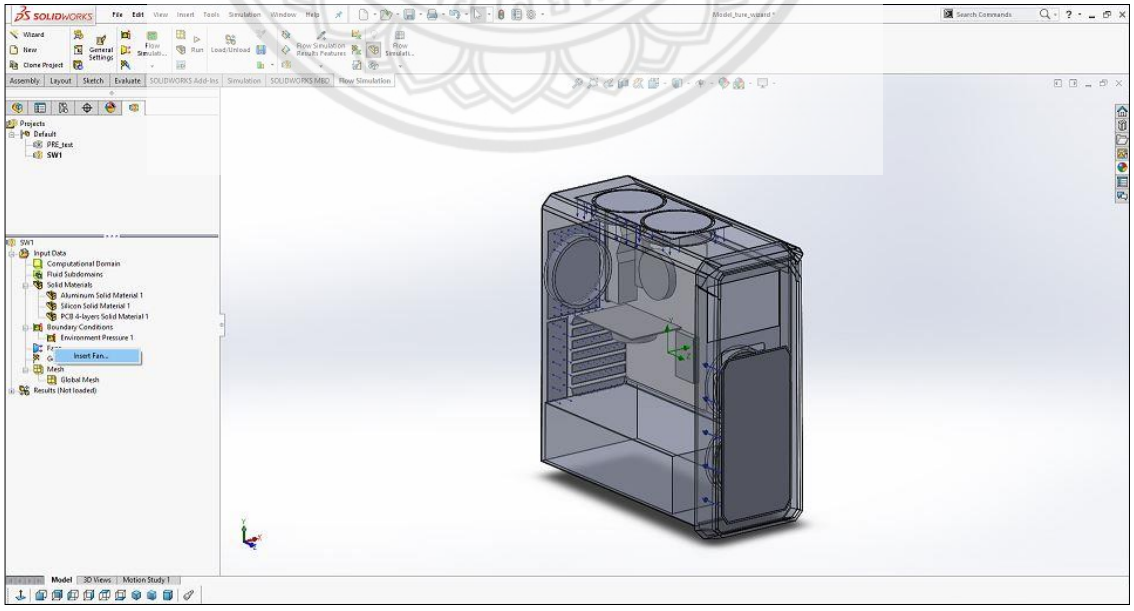


5.4 คลิก OK



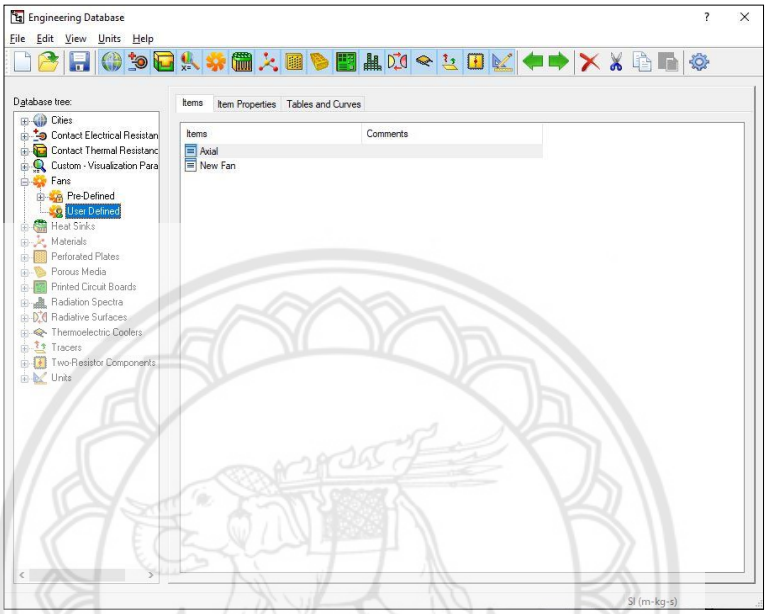
6. การกำหนดพัดลมระบายความร้อน

6.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans เลือก Insert Fans



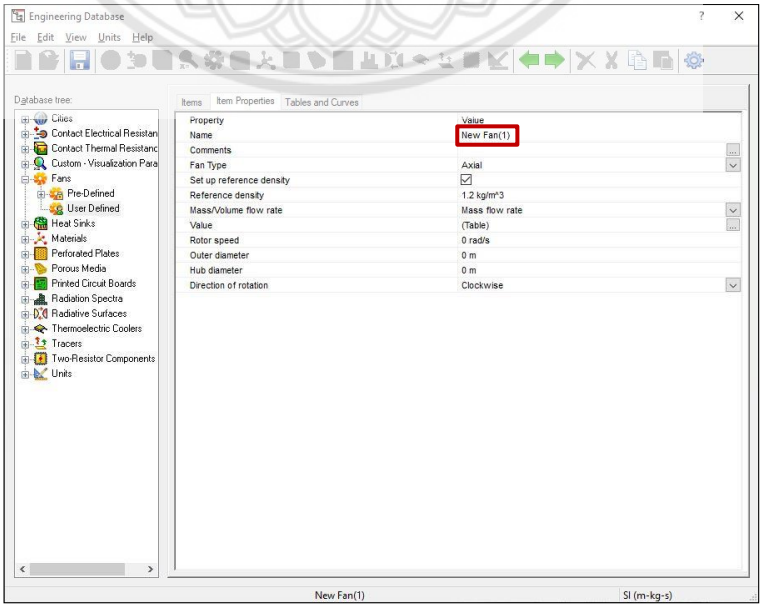
6.2 คลิกเลือก Create/Edit

6.3 จะแสดง Tool Bar ที่มีชื่อว่า Engineering Database ขึ้นมา



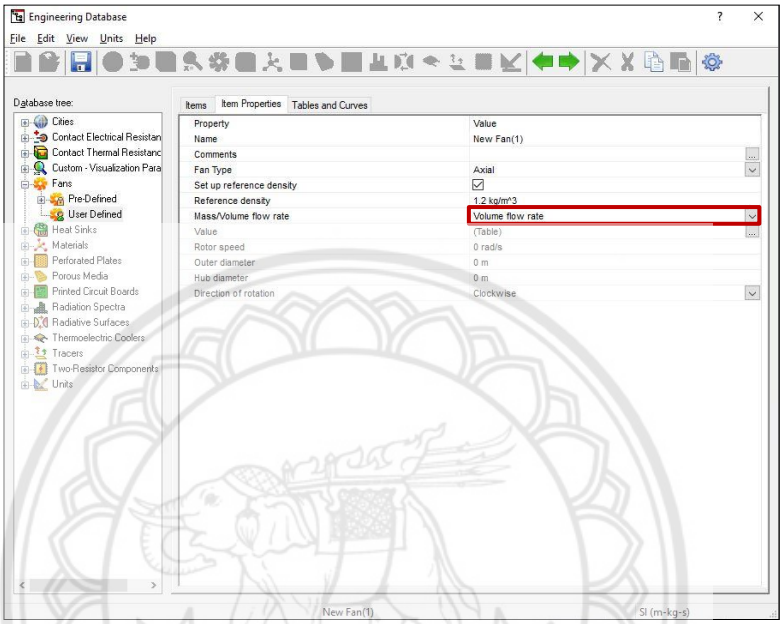
6.4 คลิกเลือก New Item

6.5 คลิก Name Fans เพื่อตั้งชื่อพัดลม

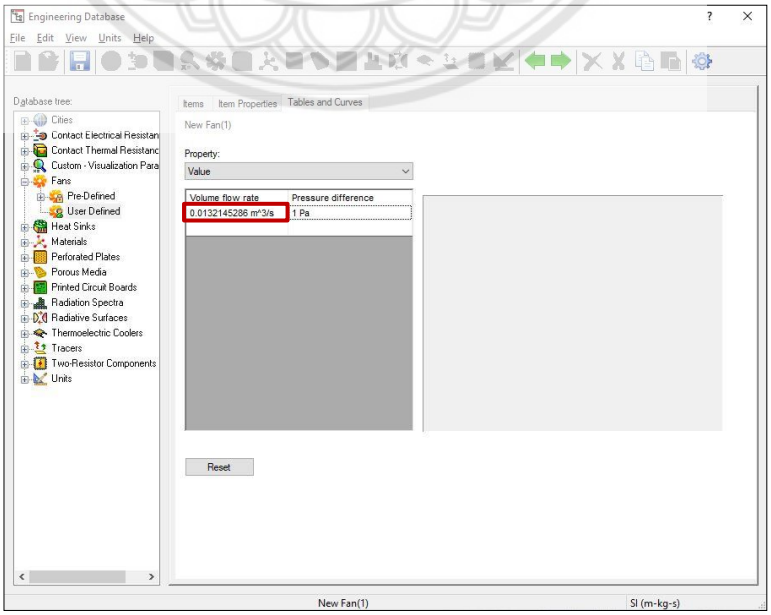


6.6 กำหนดการไหลเป็นแบบ Volume Flow Rate

6.7 คลิกซ้ายที่ [...]

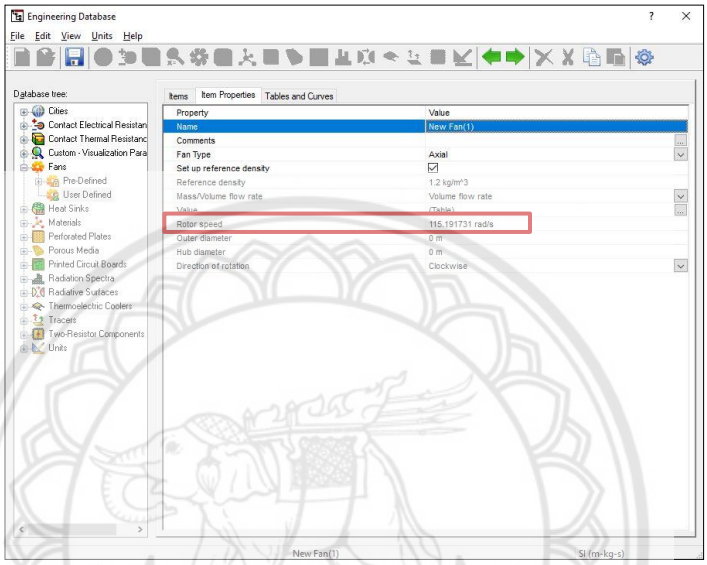


6.8 กำหนดอัตราการไหลของพัดลม (กรณีศึกษานี้ปริมาณการไหล คือ 28 CFM ให้เปลี่ยนเป็น m^3/s)



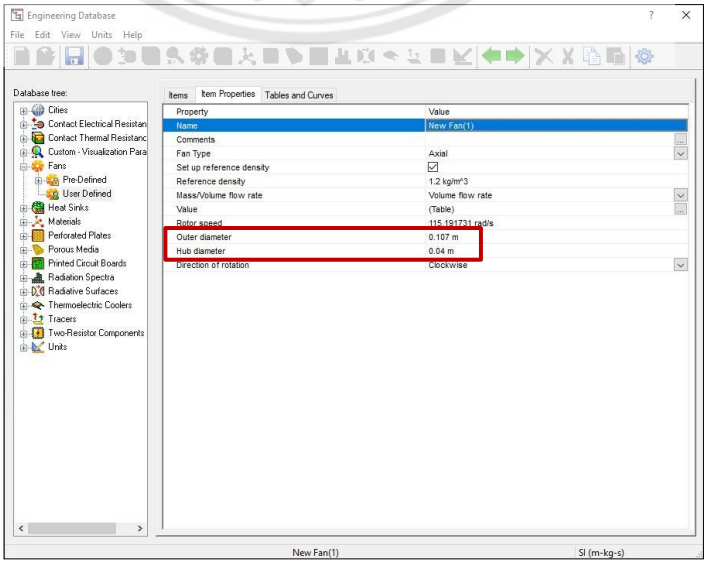
6.9 คลิกซ้ายเลือก Item Properties

6.10 กำหนดความเร็วในการหมุนของพัดลม (กรณีศึกษานี้ความเร็วของพัดลม คือ 1100 rpm ให้เปลี่ยนเป็น rad/s)



6.11 กำหนดขนาดของพัดลม (กรณีศึกษานี้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอยู่ที่ 107 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของ Hub อยู่ที่ 40 mm)

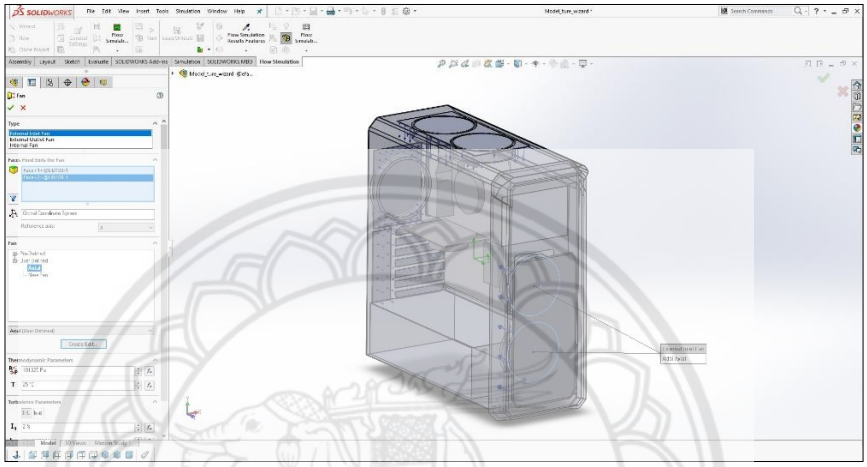
6.12 คลิกเลือก Save เพื่อทำการบันทึก



6.13 คลิกเลือก External Inlet Fan

6.14 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดเข้า คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.15 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.16 คลิก OK

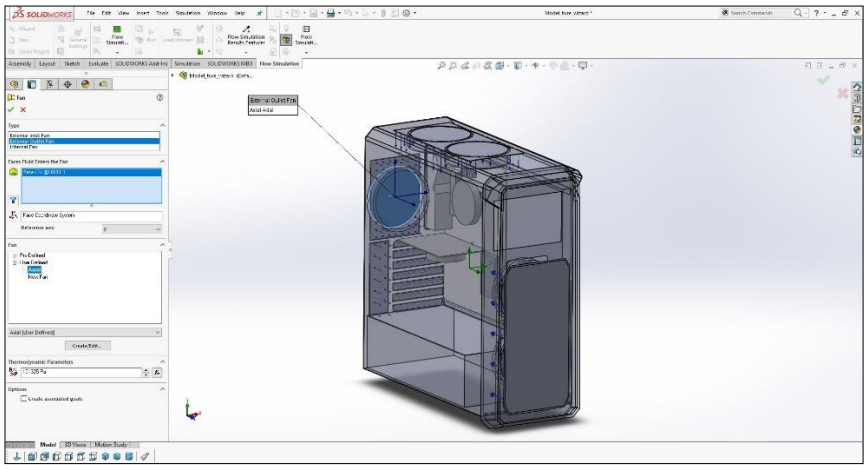
6.17 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans

เลือก Insert Fans

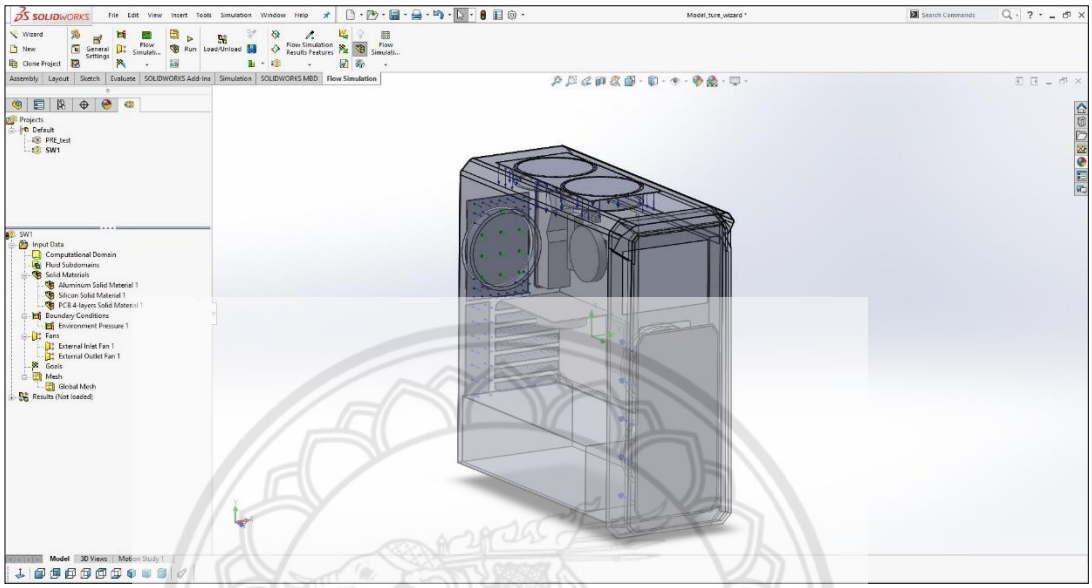
6.18 คลิกเลือก External Outlet Fan

6.19 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดออก คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.20 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.21 คลิก OK

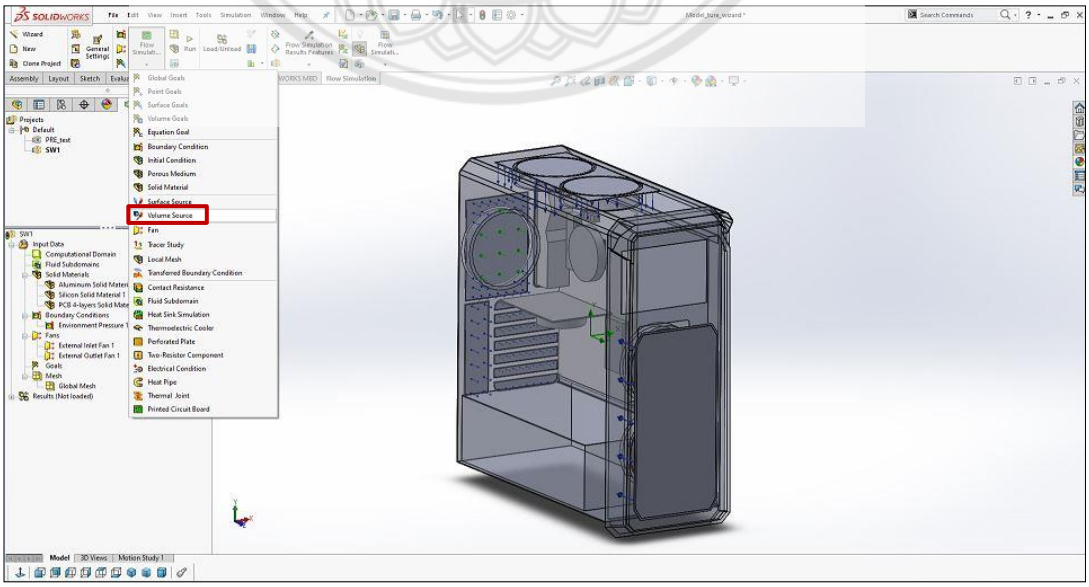


7. การกำหนดแหล่งกำเนิดความร้อน

7.1 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนของ CPU

7.1.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Flow Simulation

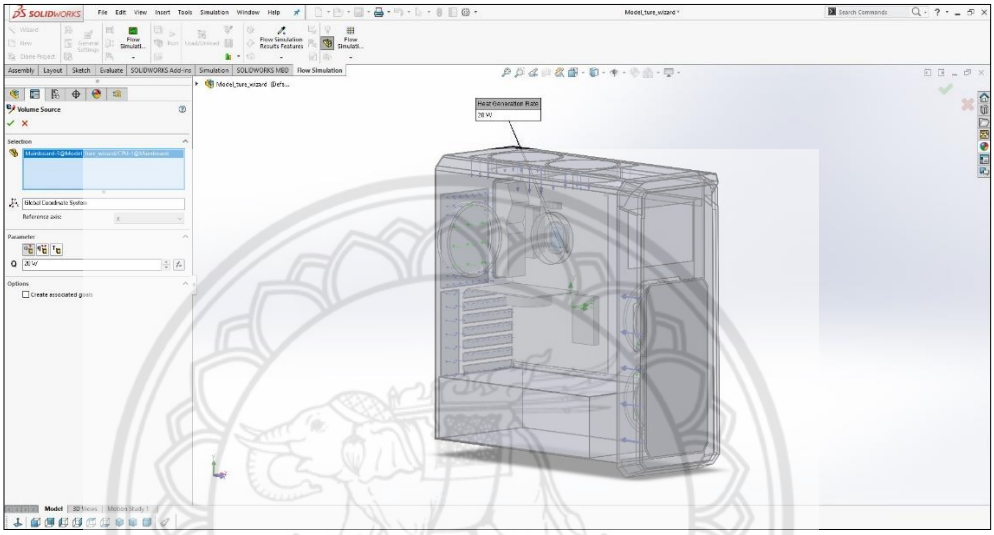
เลือก Volume Source



7.1.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนที่เป็น CPU

7.1.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Heat Generation Rate

7.1.4 กรณีศึกษานี้กำหนด Heat Generation Rate เท่ากับ 20 W

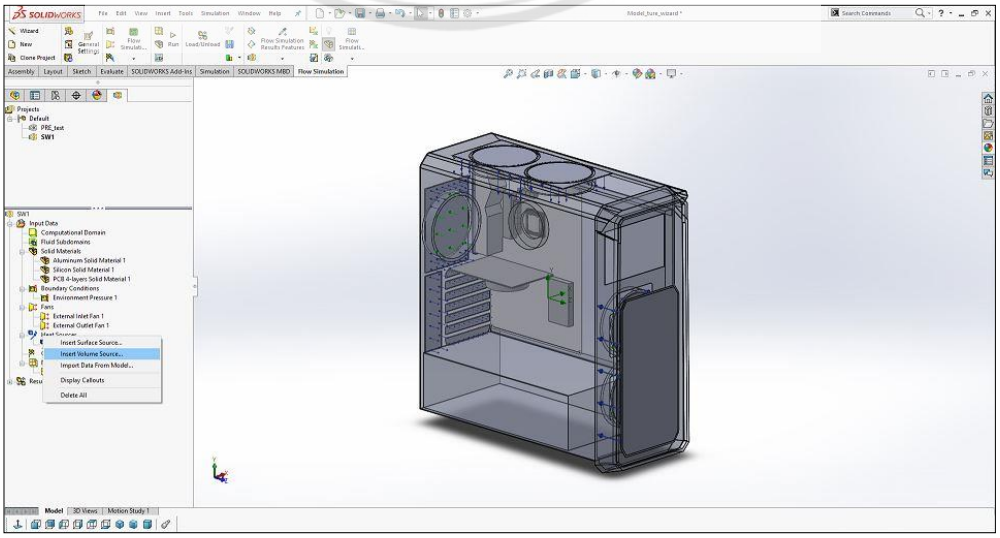


7.1.5 คลิก OK

7.2 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนผ้าจ่ายไฟขนาดเล็ก

7.2.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

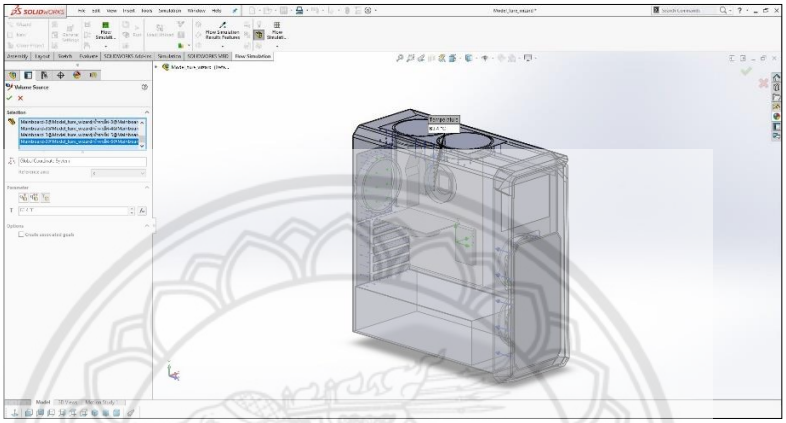
เลือก Insert Volume Source



7.2.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนผ้าจ่ายไฟขนาดเล็กทั้งหมด 10 ชิ้น

7.2.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.2.4 กรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 63.4 °C



7.2.5 คลิก OK

7.3 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนผ้าจ่ายไฟขนาดกลาง

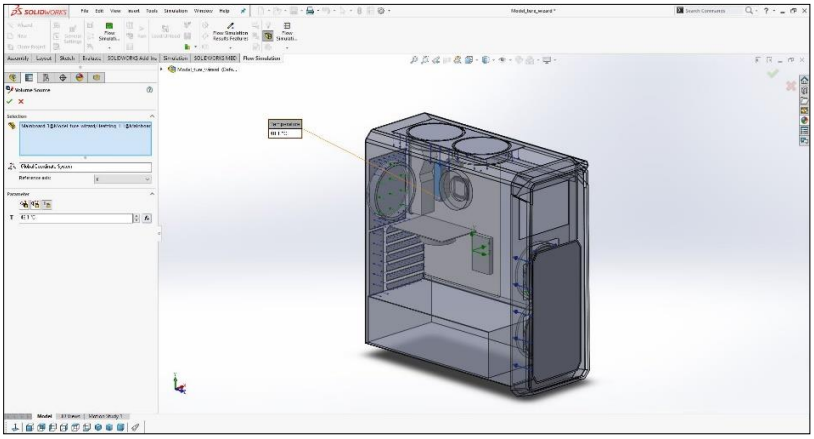
7.3.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

เลือก Insert Volume Source

7.3.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนผ้าจ่ายไฟขนาดกลางทั้งหมด 1 ชิ้น

7.3.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.3.4 กรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 48.1 °C



7.3.5 คลิก OK

7.4 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนผ้าจ่ายไฟขนาดใหญ่

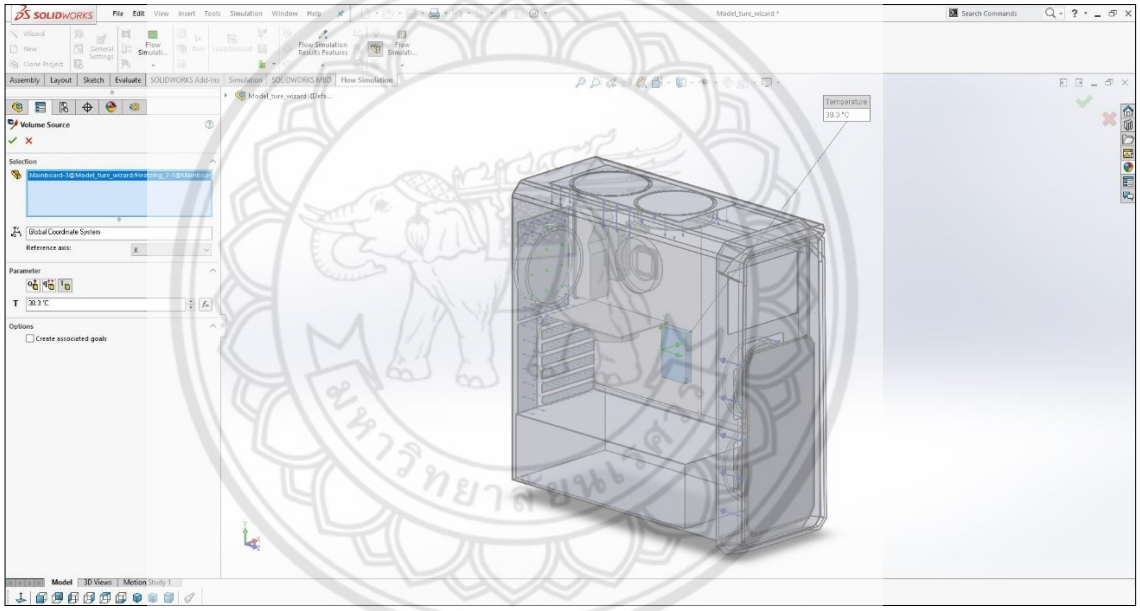
7.4.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

เลือก Insert Volume Source

7.4.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนผ้าจ่ายไฟขนาดใหญ่ทั้งหมด 1 ชิ้น

7.4.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.4.4 กรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 38.3 °C



7.4.5 คลิก OK

7.5 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนผ้าจ่ายไฟของการ์ดจอ

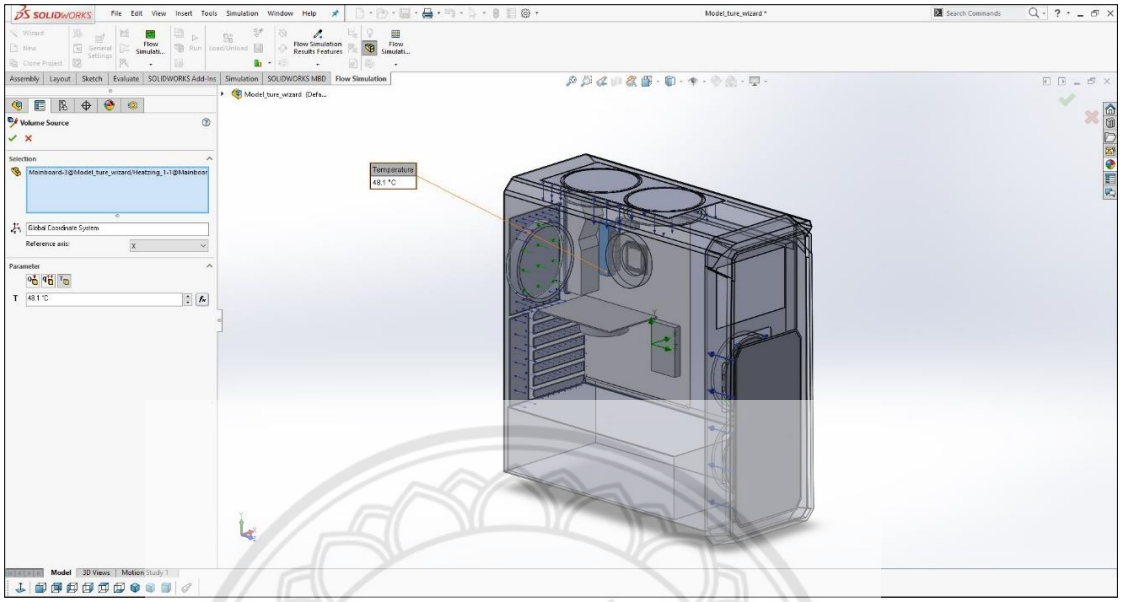
7.5.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

เลือก Insert Volume Source

7.5.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนผ้าจ่ายไฟของการ์ดจอทั้งหมด 1 ชิ้น

7.5.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

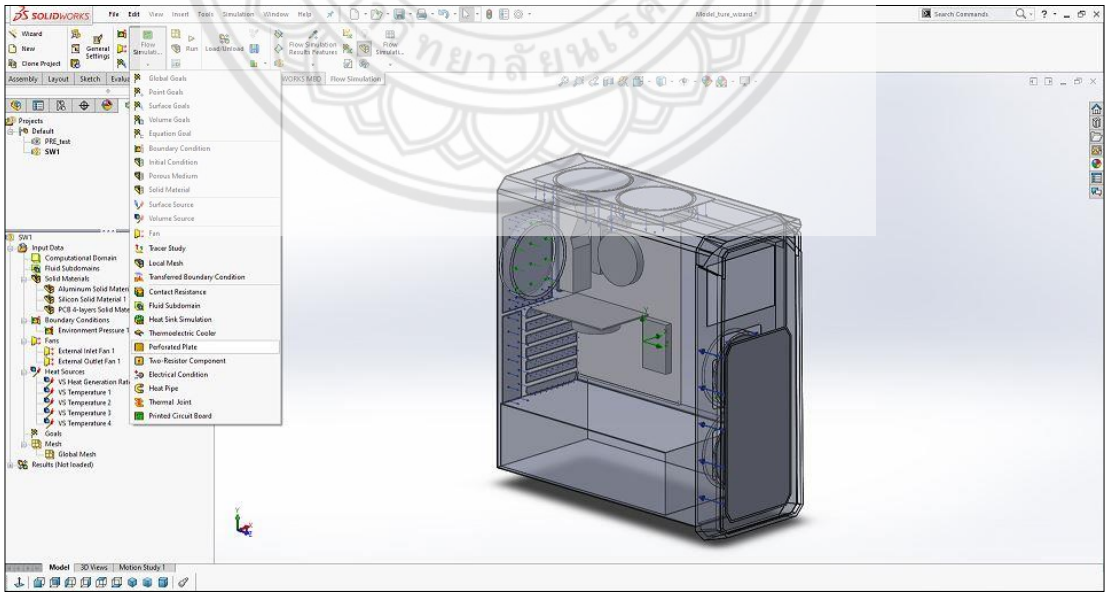
7.5.4 กรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 40.2 °C



7.5.5 คลิก OK

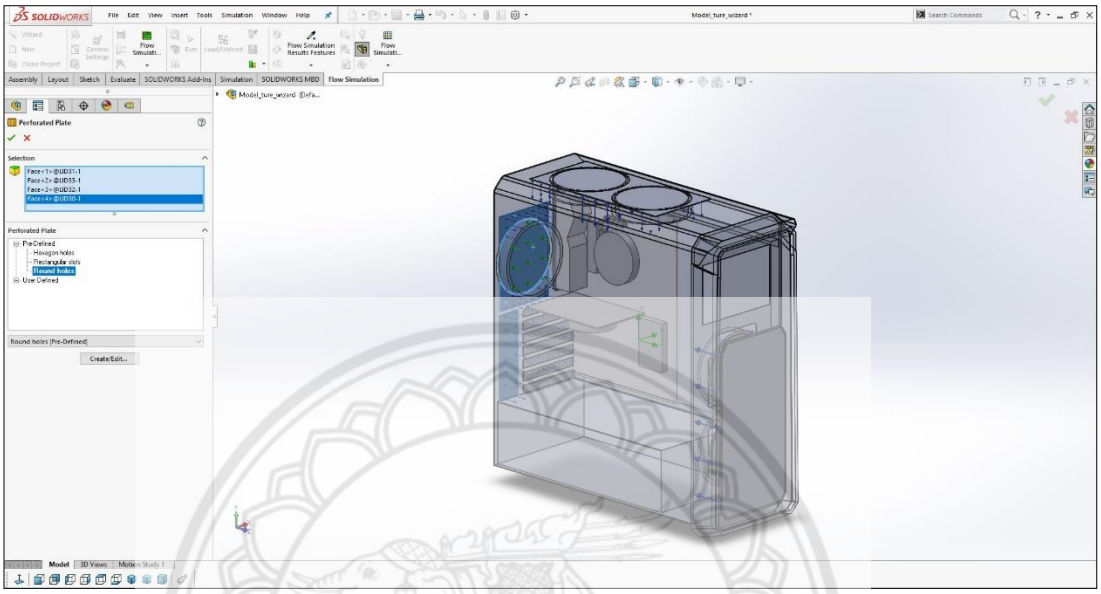
8. การกำหนดรูพรุน

8.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Flow Simulation เลือก Perforated Plate



8.2 คลิกพื้นที่ภายในของเลือก Lids ที่มีพื้นที่เป็นรูพรุน

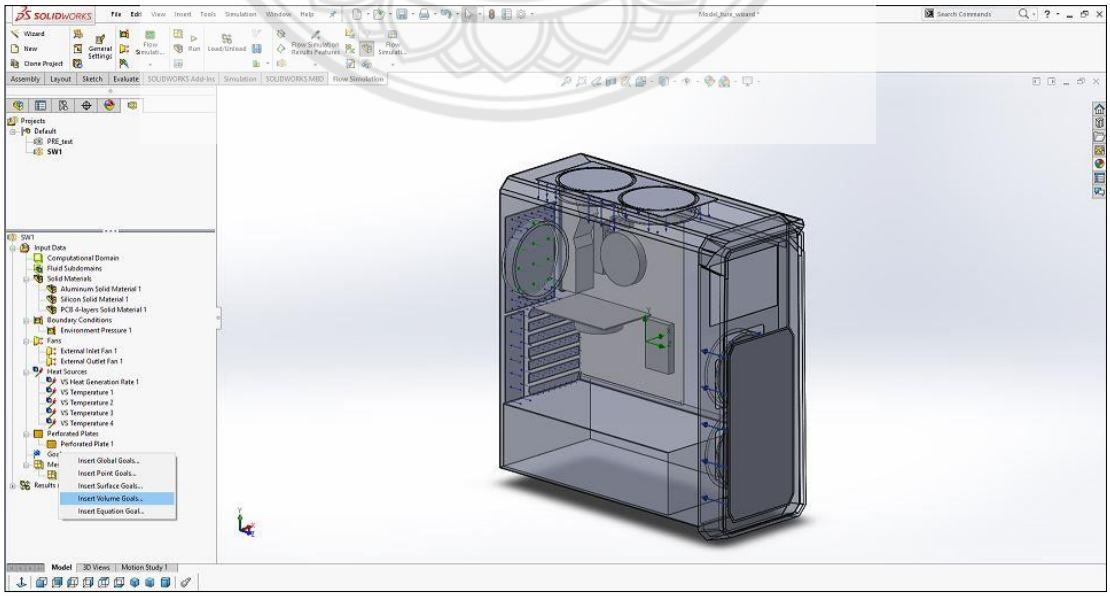
8.3 คลิกเลือกรูพรุนเป็นแบบ Round Holes



8.4 คลิก OK

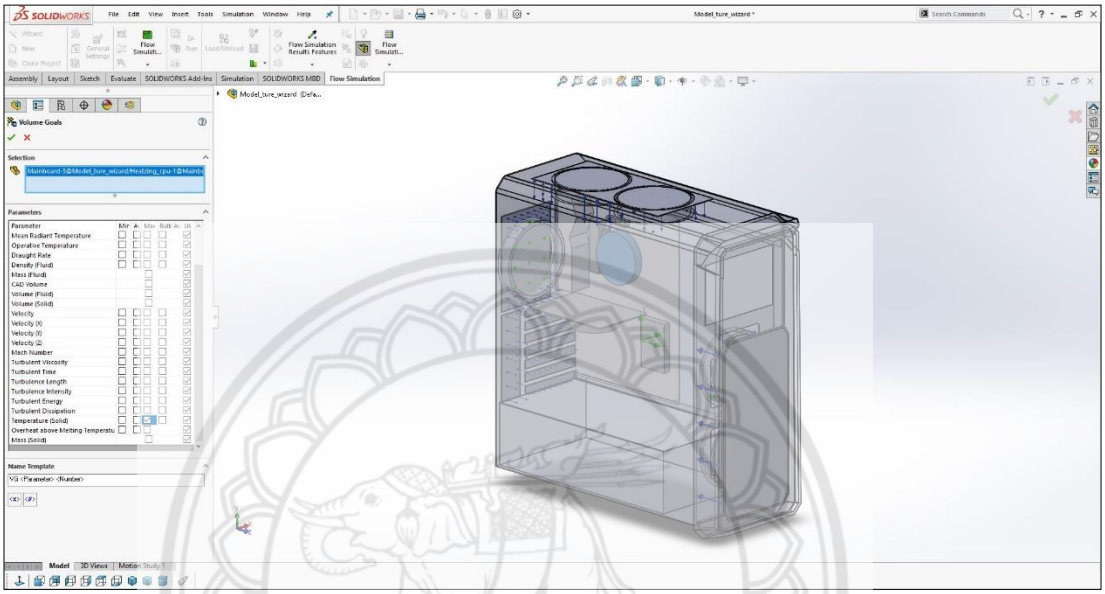
9. การกำหนดชิ้นส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อน

9.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Goals เลือก Insert Volume Goals



9.2 คลิกเลือกผ้าจ่ายไฟของ CPU

9.3 คลิกเช็คถูกที่ Temperature (Solid)



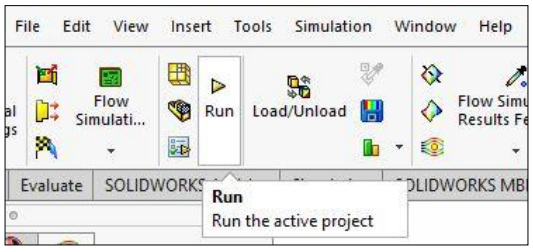
9.4 คลิก OK

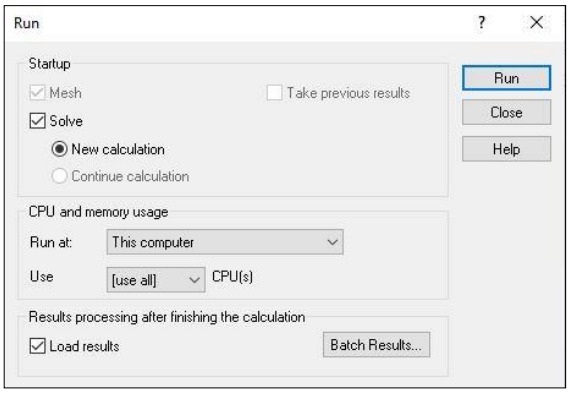
10. วิธี Run การแสดงผลของแบบจำลอง

10.1 การ Run

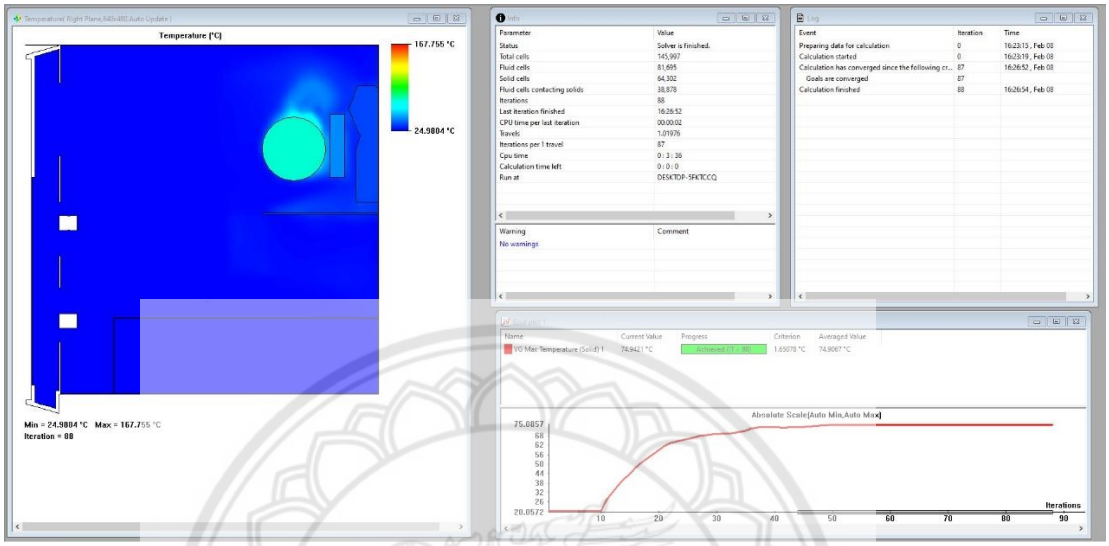
10.1.1 คลิกคำสั่ง Run

10.1.2 เลือก Solve และเช็คถูกที่ New calculation จากนั้นคลิก Run





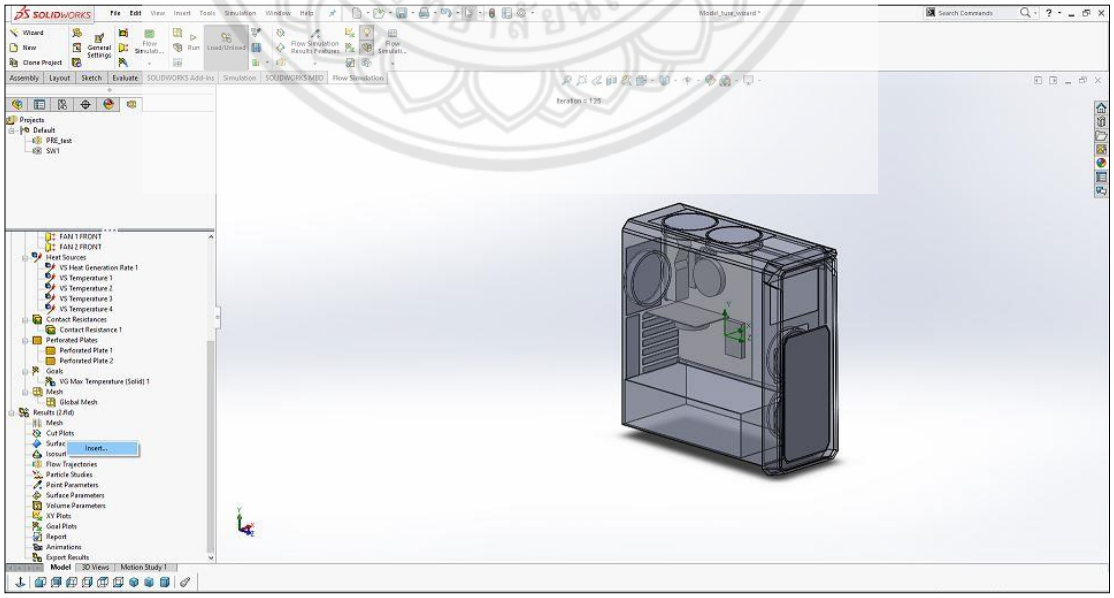
10.1.3 รอการ Calculation ของโปรแกรม



10.1.4 เมื่อ Run เสร็จแล้ว จะขึ้นข้อความว่า Solve Finish

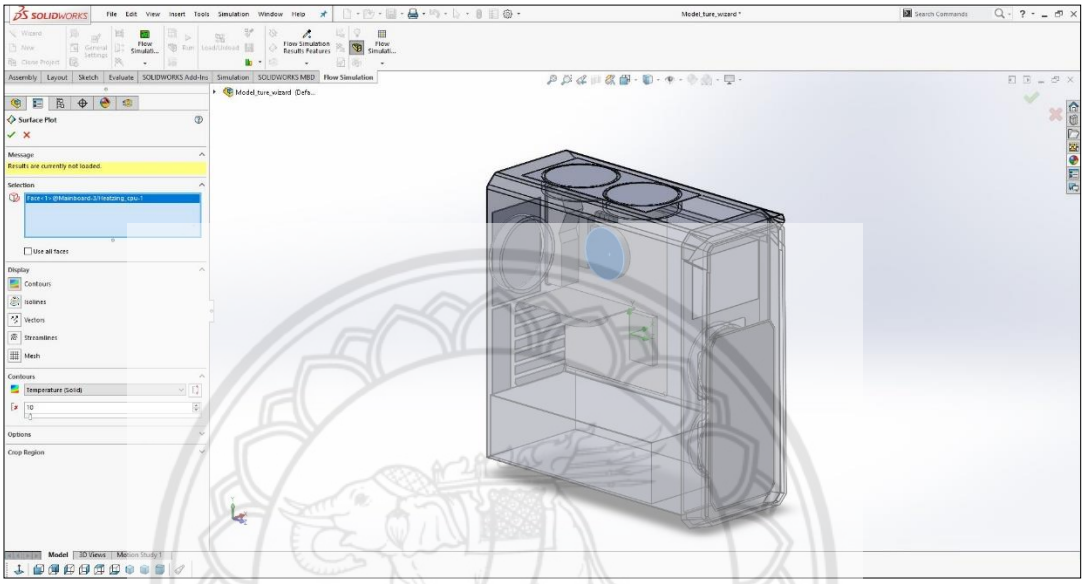
10.2 การแสดงผลของอุณหภูมิ

10.2.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Surface Plots เลือก Insert

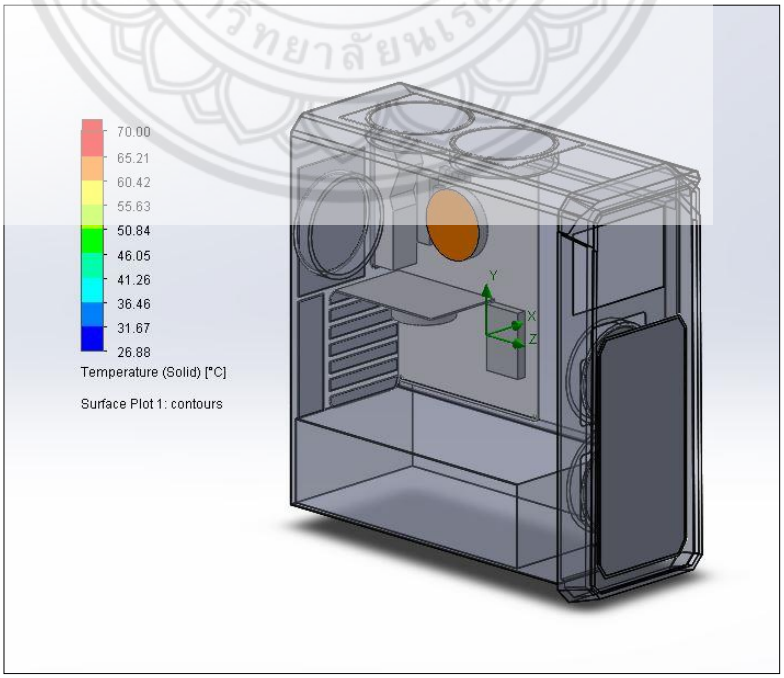


10.2.2 คลิกเลือกพื้นผิวผ้าจ่ายไฟของ CPU

10.2.3 เลือกการแสดงผลแบบ Contours และการแสดงผลเป็น Temperature (Solid)

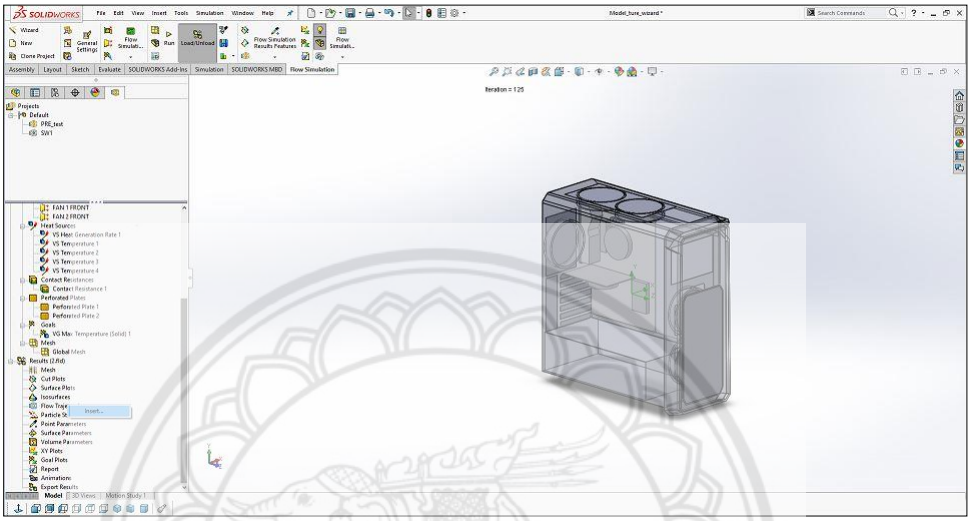


10.2.4 คลิก OK



10.3 การแสดงผลของลักษณะการไหลของกระแสลม

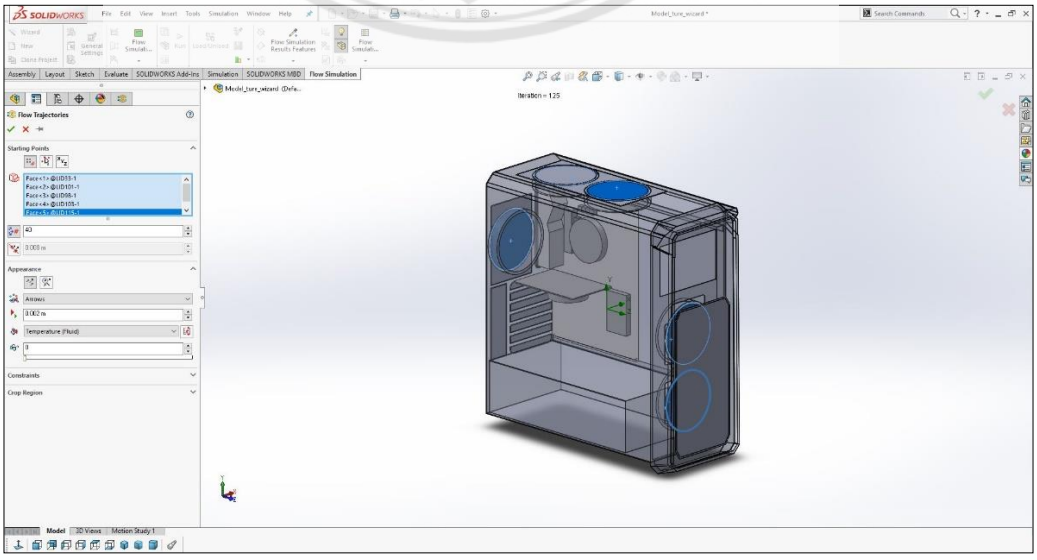
10.3.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Flow Trajectories เลือก Insert



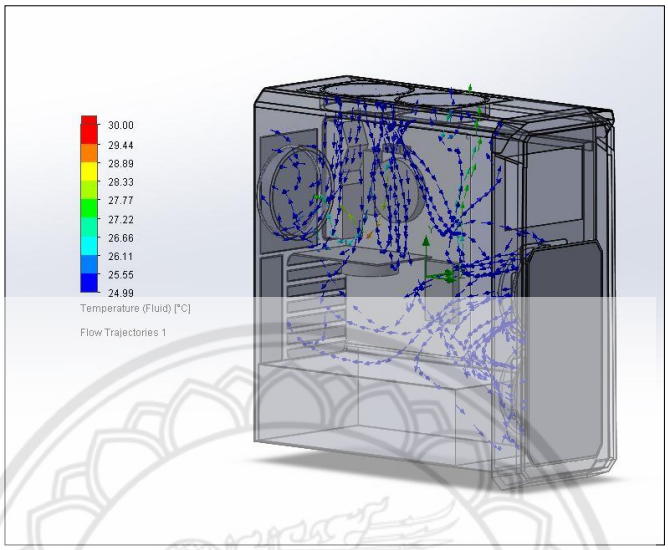
10.3.2 คลิกเลือก Lids พื้นที่หน้าตัดของพัดลม

10.3.3 เลือก Number of Points เป็น 40

10.3.4 เลือกลักษณะการไหลเป็นแบบ Arrows และเลือกการแสดงผลเป็น Temperature (Fluid)



10.3.5 คลิก OK


30.00
29.44
28.89
28.33
27.77
27.22
26.66
26.11
25.55
24.99
Temperature (Fluid) [°C]
Flow Trajectories 1

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติของอากาศ

ตารางคุณสมบัติของอากาศ

TABLE A–17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

TABLE A–17

Ideal-gas properties of air (*Concluded*)

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785–86, table A–5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).

ที่มา www.physicsforums.com