การวิเคราะห์ผลกระทบอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Effect Analysis of Cooling Fans Flow Rate in a Mid-Tower Computer Case by Finite Element Method

นายกรวิชญ์ ศรีจันทร์

นายวิทวัส จันโอ๊ก

นายเศรษฐพงศ์ พางาม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2563

แบบเสนอปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน การวิเคราะห์ผลกระทบอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ดำเนินโครงงาน

นายกรวิชญ์	ศรีจันทร์	รหัสนิสิต 60360142
นายวิทวัส	จันโอ๊ก	รหัสนิสิต 60364386
นายเศรษฐพงศ์	พางาม	รหัสนิสิต 60364843

ที่ปรึกษาโครงงาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพรัตน์ สีหะวงษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2563

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผศ.นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

หัวข้อโครงงาน : การวิเคราะห์ผลกระทบอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายกรวิชญ์ ศรีจันทร์ รหัสนิสิต 60360142

นายวิทวัส จันโอ๊ก รหัสนิสิต 60364386

นายเศรษฐพงศ์ พางาม รหัสนิสิต 60364843

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2563

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศและที่ทิศทางเข้า – ออกของพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm. ที่ส่งผลต่อการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid – Tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อัตราการไหลของอากาศที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 10, 20, 30, 40 และ 50 CFM ซึ่งการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทำโดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองด้วยการวัดค่าอุณหภูมิกับผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation โดยกำหนดให้อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 24 °C ผลจากการเปรียบเทียบ พบว่าค่า Root Mean Square Error และ Mean Bias Difference ของ CPU ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.70 และ 0.74 มีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum ที่เท่ากับ 1 ดังนั้นถือว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศและทิศทางเข้า – ออกของพัดลมระบายความร้อน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นกรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัวและ 5 ตัว จากผลการวิเคราะห์พบว่า กรณีการติดตั้งพัดลม 3 ตัวโดยติดพัดลมคู่ด้านหน้า การติดตั้งพัดลมให้ดูดอากาศออก จะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่าและอัตราการไหลของอากาศจะแปรผันตรงกับการลดลงของอุณภูมิ CPU ส่วนกรณีการติดตั้งพัดลมคู่ด้านบน การติดตั้งให้พัดลมดูดอากาศเข้าจะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่า และในส่วนอัตราการไหลที่เหมาะสมต่อการระบายความร้อน คือ มากว่า 30 CFM ขึ้นไป ในกรณีการ

ติดตั้งพัดลม 5 ตัว อัตราการไหลที่เหมาะสมคือมากกว่า 30 CFM และลักษณะการติดตั้งพัดลมที่เหมาะสมที่สุด คือ การติดตั้งคู่พัดลมด้านบนให้ดูดอากาศเข้า ส่วนคู่ด้านหน้าให้ดูดอากาศออก

Project Title : Effect Analysis of Cooling Fans Flow Rate in a Mid-Tower Computer Case by Finite Element Method

Name : Mr. Korawit Srijun ID. 60360142

Mr. Wittawas Chanok ID. 60364386

Mr. Settapong Pangam ID. 60364843

Project Advisor : Asst. Prof. Nopparat Seehawong

Major : Mechanical Engineering

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2020

Abstract

The project aims to study changes in airflow both in and out directions of a 120 mm cooling fan, which affects cooling inside a mid – tower computer case, by using the Finite element methodology. The airflow rate studied consisted of 10, 20, 30, 40, and 50 CFM. The model was validated by comparing the measured temperature values of the experiment with the results of the program's analysis of the Finite element model. Solidworks Flow Simulation with an external temperature of 24 oC assumption was applied. The Root Mean Square Error and Mean Bias Difference values of the CPU, 0.70 and 0.74 respectively, are less than quadratic sums which are 1, so the Finite element power model is considered acceptable. The model was then used to change the airflow rate and the cooling fan's inlet and outlet direction. The study was divided into 3 and 5 fan installation cases. For the case of 3 fans installation, 2 frontal exhaust fans case provides better cooling results. The airflow rate is proportional to the drop in CPU temperature. Moreover, installing 2 upper intake fans also shows a better cooling effect. The flow rate that is suitable for cooling is 30 CFM or more. Finally, for the case of installing 5 fans, the optimal flow rate is more than 30

CFM, and the optimal fan installation style is 2 upper intake fans on the top with 2 frontal exhaust air fans at the front.

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

นายกรวิชญ์ ศรีจันทร์
นายวิทวัส จันโอ๊ก
นายเศรษฐพงศ์ พางาม

สารบัญ

เรื่อง **หน้า**

แบบเสนอโครงร่างปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูปภาพ ..... ญ
สารบัญสัญลักษณ์ ..... ฐ
บทที่ 1 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.4 ประโยชน์ที่ขาดว่าจะได้รับ 2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.6 แผนการดำเนินงาน 3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ 3
บทที่ 2 4
2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 4
2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 6
2.3 เปอร์เซนความคลาดเคลื่อน 11

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

2.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error Propagation) 11
2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation 14
บทที่ 3 17
3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 18
3.2 ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ 18
3.3 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 25
3.4 วิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 30
3.5 เลือกรูปแบบการติดตั้งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้าออกของลม 32
3.6 กำหนดค่าอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อน 32
3.7 วิเคราะห์และสรุปผล 32
บทที่ 4 33
4.1 กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว 33
4.2 กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว 41
บทที่ 5 47
5.1 สรุปผล 47
5.2 ข้อเสนอแนะ 48
เอกสารอ้างอิง 49
ภาคผนวก ก 50
ภาคผนวก ข 133
ภาคผนวก ค 177

สารบัญตาราง

เรื่อง **หน้า**

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....3

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์เครื่องวัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์.....23

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....31

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านหน้า.....34

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....35

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านบน.....37

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....38

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว.....42

ตารางที่ 4.6 แสดงอุณภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....43

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์....4
รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อน....6
รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนัง....7
รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน....9
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อ....10
รูปที่ 2.6 การขึ้นรูปแบบจำลอง....14
รูปที่ 2.7 การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้....14
รูปที่ 2.8 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ....15
รูปที่ 2.9 การการวิเคราะห์แบบจำลอง....15
รูปที่ 2.10 แสดงผลการวิเคราะห์....16
รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงาน....17
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ....18
รูปที่ 3.3 ด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์....19
รูปที่ 3.4 ด้านหลังของเคสคอมพิวเตอร์....20
รูปที่ 3.5 ด้านบนของเคสคอมพิวเตอร์....20
รูปที่ 3.6 ด้านข้างของเคสคอมพิวเตอร์....21
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล....21
รูปที่ 3.8 พัดลมระบายความร้อน....22
รูปที่ 3.9 การทดสอบอุปกรณ์เครื่องวัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์....22
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ....24

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 3.11 การทำงานของ CPU.....25
รูปที่ 3.12 เคสคอมพิวเตอร์.....26
รูปที่ 3.13 เมนบอร์ด.....27
รูปที่ 3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เคสคอมพิวเตอร์กับเมนบอร์ด.....27
รูปที่ 3.15 คุณสมบัติของอลูมิเนียม.....28
รูปที่ 3.16 คุณสมบัติของ PCB.....28
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของซิลิคอน.....29
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางเข้า-ออกกระแสของลม.....29
รูปที่ 3.19 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ.....30
รูปที่ 4.1 แสดงทิศทางการไหลของอากาศ กรณี พัดลมคู่ด้านหน้า.....33
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....35
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณีพัดลมคู่ด้านหน้ากระแสลมเข้า (รูปแบบที่ 1) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....36
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณีพัดลมคู่ด้านหน้ากระแสลมออก (รูปแบบที่ 2) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....37
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านบน.....39
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณีพัดลมคู่ด้านบนกระแสลมเข้า (รูปแบบที่ 3) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....40

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณีพัดลมคู่ด้านบนกระแสลมออก (รูปแบบที่ 4) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....41
รูปที่ 4.8 แสดงทิศทางการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว.....41
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว.....44
รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
ของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 1) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....45
รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
ของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 2) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....46
รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
ของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 3) ที่อัตราการไหล 50 CFM.....46

สารบัญสัญลักษณ์

$\{f\}$	Local Force Vector
$[k]$	Local Stiffness Matrix
$\{d\}$	Local Displacement Vector
q''_x	อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (W/m^2)
k	thermal conductivity เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำผนัง (W/m·K) เครื่องหมาย (-) หมายถึง การถ่ายเทความร้อนไปยังทิศทางของการลดอุณหภูมิ
$\frac{dT}{dx}$	ผลต่างของอุณหภูมิตามแนวแกน x
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
C_p	ความร้อนจำเพาะ
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
σ	ค่าคงที่สตีฟาน-โบลซ์มันซ์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.669×10^{-8} W/m^2K^4
ε	ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่ง $0 \leq \varepsilon \leq 1$
T_A	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (K)
A	พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิววัตถุ (K)

T_{sur}	อุณหภูมิโดย (K)
x_{best}	ค่าที่วัดได้
δx	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์
M	ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
E	ผลจากการทดลอง
N	จำนวนข้อมูล

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีบทบาทมากขึ้นในสังคม หนึ่งในนั้นคือคอมพิวเตอร์ที่เข้าไปมีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกอาชีพไม่ว่าจะเป็นแบบทางการหรือด้านความบันเทิง เช่น นักกีฬา E-sport โปรแกรมเมอร์สถาปนิก และวิศวกร เป็นต้น ซึ่งอาชีพเหล่านี้ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อตอบสนองความต้องการในการทำงานออกมาได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพมากที่สุด

สำหรับคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่ต้องทำงานเต็มกำลังเป็นระยะเวลานาน จำเป็นจะต้องมีระบบการระบายความร้อนเป็นอย่างดี เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ มีความร้อนสูงมากจนเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของคอมพิวเตอร์ลดลง โดยทั่วไปขนาดของคอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ส่วนมากจะเป็นเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower ที่มักจะออกแบบให้ติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm ได้จำนวน 5 ตัว ซึ่งพัดลมในแต่ละยี่ห้อจะมีความเร็วรอบและลักษณะของใบพัดที่แตกต่างกัน จึงทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการระบายความร้อนในตัวเคสคอมพิวเตอร์แตกต่างกัน

สำหรับโครงงานนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบอัตราการไหลของอากาศที่ส่งผลต่อการระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ โดยเป็นการศึกษาด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเลือกซื้อหรือออกแบบพัดลมระบายความร้อนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ผลกระทบอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว

1.3.2 เป็นการศึกษาการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ที่ติดตั้งพัดลมระบายความร้อนได้ 5 ตัว

1.3.3 ไม่คิดคำนวณผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่ขาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation

1.5.3 ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ โดยการอ่านค่าความร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ

1.5.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

1.5.5 เมื่อแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกต้องตามเกณฑ์ จึงจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งและอัตรา การไหลของพัดลมระบายความร้อนและวิเคราะห์ผลการระบายความร้อนของแบบจำลอง

1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้

1.5.7 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2563								
	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง									
2. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation									
3. ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์									
4. เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง									
5. ทำการเปลี่ยนตำแหน่งและอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อนและวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง									
6. วิเคราะห์และสรุปผล									
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.7.1 กระดาษ 500 บาท

1.7.2 จัดทำรูปเล่ม 2,000 บาท

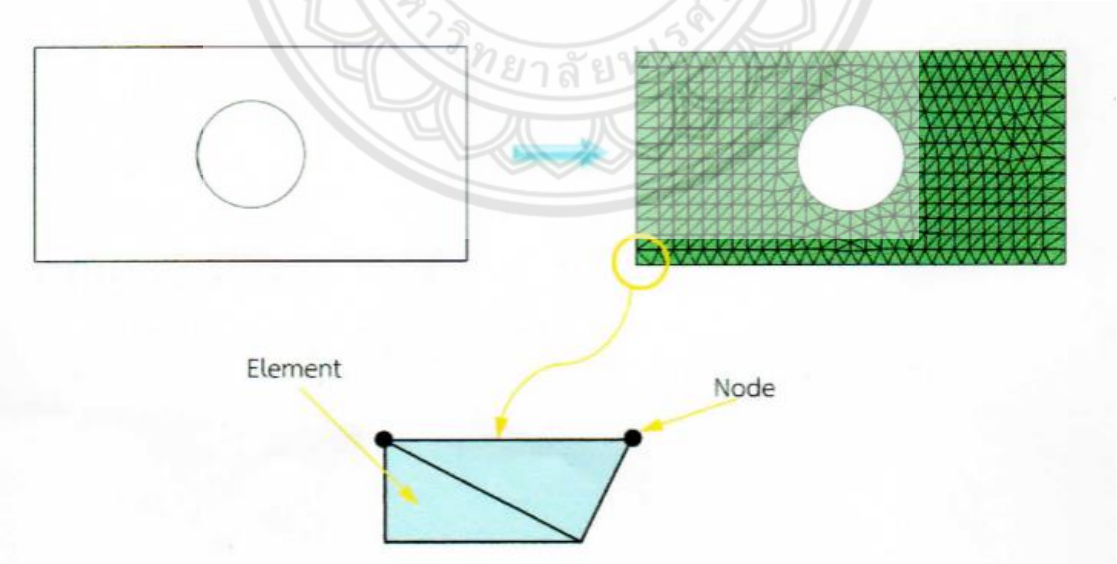
1.7.3 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ 500 บาท

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การคำนวณอุณหภูมิภายในเคสคอมพิวเตอร์มีความซับซ้อน ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากความสามารถวิเคราะห์ได้โดยง่ายและสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ซึ่งระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีแนวคิดที่ว่าวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนใดๆ จะสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้โดยแต่ละชิ้นเล็กๆ เหล่านั้นสามารถพิจารณาแยกกันอย่างมีอิสระและสามารถประกอบเข้าด้วยกันกลับมาเป็นวัตถุรูปแบบเดิมได้ โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เหมาะสมกับปัญหาที่ยุ่งยากซับซ้อน ที่ไม่สามารถหาผลเฉลี่ยแม่นตรงได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะแก้ปัญหาให้อยู่ในรูปฟังก์ชันพีชคณิตแล้วจากนั้นจึงใช้คอมพิวเตอร์คำนวณหาผลลัพธ์ โดยมีหลักการและขั้นตอนดังนี้

2.1.1 แบ่งวัตถุที่พิจารณาออกเป็นชิ้นเล็กๆ เรียกว่า Element ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วย Node ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งเอลิเมนต์

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

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

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)

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

2.1.4 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต

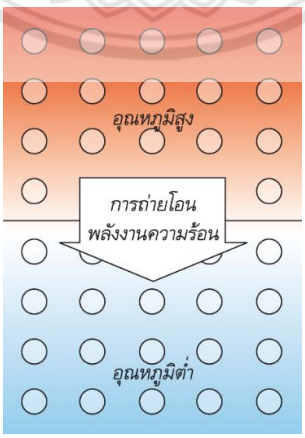
2.1.5 แก้ระบบสมการเพื่อหา {D} ซึ่งในกรณีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน {D} คือ อุณหภูมิที่ Node ต่างๆ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังที่ได้กล่าวข้างต้น จะถูกใช้งานผ่านโปรแกรม Solidwork Flow Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบชิ้นงานและใช้วิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Pre-processing เป็นขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลองเพื่อที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย
    - การขึ้นรูปชิ้นงาน
    - การทำแบบจำลองให้อยู่ในรูปอย่างง่าย
    - การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
    - การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต
    - การกำหนดชนิดของภาระที่มากระทำ
    - การแบ่ง Element ของแบบจำลอง
2. Processing เป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์แบบจำลอง
3. Post-processing เป็นขั้นตอนของการแสดงผลการวิเคราะห์

2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

2.2.1 การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่อยู่นิ่ง เมื่อตัวกลางมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อน

ซึ่งอาศัยทฤษฎีของฟูเรียร์ (Fourier's law) ดังสมการการนำความร้อนจากสมการที่ 3

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

โดยที่

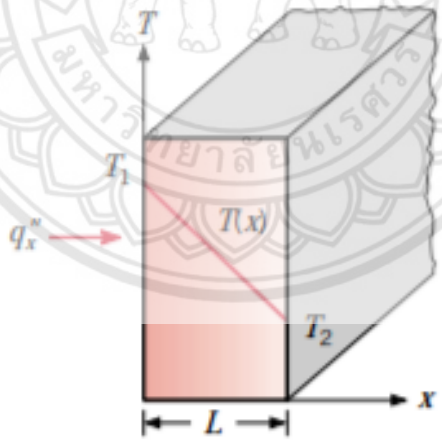
q''_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (W/m^2)

k คือ thermal conductivity เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำผนัง (W/m·K)

เครื่องหมาย (-) หมายถึง การถ่ายเทความร้อนไปยังทิศทางของการลดอุณหภูมิ

$\frac{dT}{dx}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิตามแนวแกน x

ภายใต้สภาวะ steady-state conditions การถ่ายเทความร้อนเป็นรูปแบบเชิงเส้น การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนัง

ที่ x = L ผลต่างของอุณหภูมิจะเป็น

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \qquad (4)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อหน่วยพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อนเป็น

$$q''_x = -k\frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q''_x = k\frac{T_1 - T_2}{L} = k\frac{\Delta T}{L} \qquad (5)$$

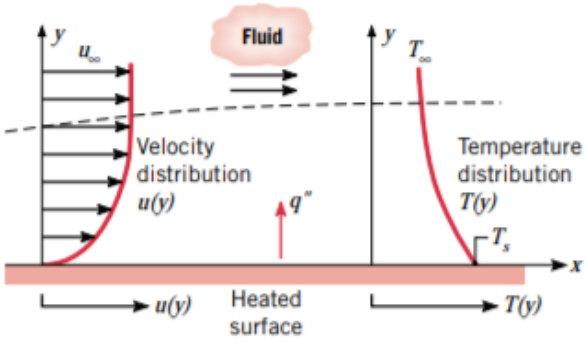
ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนผ่านผนังพื้นที่ A คือ $q_x(W) = q''_x \times A$

2.2.2 การพาความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้นเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพายังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free convection) และการพาโดยการบังคับ (Forced convection) อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 6 ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$q = h\left[T_h - T_C\right] \qquad (6)$$

สมการนี้เป็นสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ในกรณีทั่วๆ ไป ปริมาณที่สำคัญที่สุดในสมการนี้ก็คือ h (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน)

ถ้ารู้ค่าของ h จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ จะเห็นว่ามีปริมาณต่างๆ มากมายที่มีอิทธิพลต่อการพาความร้อน เช่น ลักษณะและการวางตัวของพื้นผิว ความเร็วของของไหล (ในกรณีของการพาโดยการบังคับ) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวและของไหล (ในกรณีของการพาตามธรรมชาติ) เพราะปริมาณนี้จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลขึ้น คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) ค่าการนำความร้อน (k) ความร้อนจำเพาะ (C_p) เป็นต้น การที่จะคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ เราจะต้องรู้ว่าแต่ละปริมาณที่กล่าวมาแล้ว มีอิทธิพลอย่างไรต่อค่าของ h วิธีการที่จะคำนวณหาค่า h จึงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน การจะหาสมการทั่วๆไป สมการเดียวมาใช้สำหรับคำนวณ h ให้ใช้ได้ในทุกกรณีนั้นยังทำไม่ได้ จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการศึกษาเรื่อง การพาความร้อนสำหรับวิศวกรก็คือ การหาวิธีที่จะคำนวณค่า h ในกรณีที่สำคัญๆ ซึ่งพบกันบ่อยๆ ในทางวิศวกรรมศาสตร์



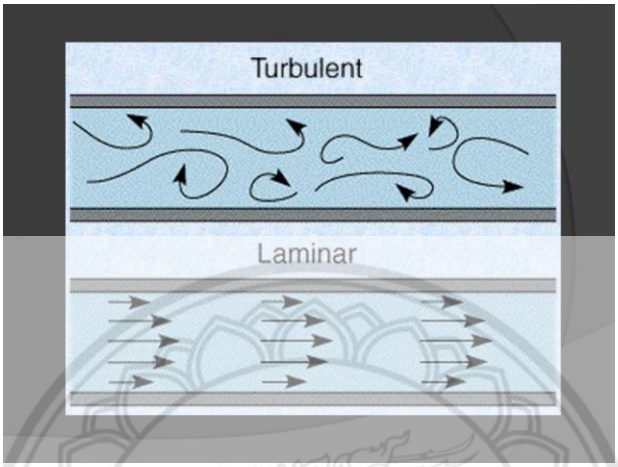
รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

ก. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural or free convection) การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลไม่ถูกทำให้เคลื่อนไหวโดยกลไกภายนอก วัตถุซึ่งมีผิวเรียบอยู่ในของไหลซึ่งอยู่นิ่งถ้าอุณหภูมิของผิวสูงกว่าอุณหภูมิของของไหล ความร้อนจะเริ่มเคลื่อนที่มายังของไหลที่ชิดกับผนัง ทำให้ความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ชิดผนังต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันให้ของไหลลอยตัวขึ้นของไหลที่อยู่ต่ำกว่า ก็จะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ และทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล

เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณต่างๆ หลายปริมาณ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล ขนาดและลักษณะของของแข็ง อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างของไหลและพื้นผิว นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของสาร ซึ่งมีผลต่อแรงลอยตัวของสารก็ยังมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนด้วย ถ้าจะหาสมการมาใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่ยากมาก และทำได้ในกรณีง่ายๆ บางกรณีเท่านั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการพาตามธรรมชาติส่วนมากแล้วได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ

ข. การพาโดยการบังคับ (Forced convection) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือสูบน้ำ เมื่อของเหลวมีความเร็ว เราจะต้องทราบกลไกในการเคลื่อนที่ของของไหลก่อน โดยปกติเราจะแบ่งการไหลของของไหลเป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในการไหลแบบราบเรียบซึ่งของไหลไหลเป็นชั้นๆ ขนานกับความร้อน ถ่ายเทจากผิวของของแข็งโดยการนำ และถ่ายเทต่อๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านชั้นของของไหล ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งของไหลเคลื่อนที่

อย่างไม่มีระเบียบ มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลด้วย การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมา แล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นยิ่งการไหลแบบปั่นป่วนมากเท่าใด การเคลื่อนที่ของความร้อนจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การพาโดยการบังคับของการเคลื่อนที่ของของไหล



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของของไหลภายในท่อ

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนออกรอบๆ พื้นที่ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางการถ่ายเทความร้อน ไม่เหมือนกับการนำและการพาความร้อน การแผ่รังสีจะแผ่รังสีได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดในภายใต้สภาวะสุญญากาศ

$$Q = \sigma \varepsilon A \left(T_S^4 - T_{sur}^4 \right) \quad (7)$$

โดยที่

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

σ คือ ค่าคงที่สตีฟาน-โบลซ์มันซ์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.669×10^{-8} W/m^2K^4

ε คือ ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่ง $0 \leq \varepsilon \leq 1$

T_A คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (K)

A คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

สำหรับโครงงานนี้จะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อน จะไม่นำการแผ่รังสีความร้อนมาวิเคราะห์ เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนนั้น เมื่อนำมาคำนวณแล้วได้ค่าที่มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับการนำความร้อนและการพาความร้อน

2.3 เปอร์เซนความคลาดเคลื่อน

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) คือ ค่าความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบจากค่าที่เป็นจริงและถูกต้อง

สมการเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อน

$$\text{Percentage error} = \frac{|M - E|}{E} \times 100\% \quad (8)$$

โดยที

M คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E คือ ผลจากการทดลอง

2.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Error Propagation)

2.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อน

ก. ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถดูได้จากการวัดค่าโดยตรง ดังสมการที่ 8

$$\text{measued } x = x_{best} \pm \delta x \quad (8)$$

เมื่อ x_{best} คือ ค่าที่วัดได้

δx คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

โดยปกติเครื่องวัดแต่ละแบบจะมีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบ แต่ถ้าในกรณีที่เครื่องวัดไม่มีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน เช่น เครื่องมือวัดชนิดแบบขีด ให้ใช้ค่าความ

คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เป็นครึ่งหนึ่งของขนาดขีดที่เล็กที่สุด ตัวอย่างเช่น เมื่อนำเทอร์โมมิเตอร์ไปวัดอุณหภูมิของน้ำพบว่า

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

ซึ่งจากสมการที่ 8 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ คือ $\pm 0.5\,^{\circ}C$

ข. ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่นำค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง ดังสมการที่ 9

$$\text{measued } x = \frac{\delta x}{|x_{best}|} \qquad (9)$$

ตัวอย่างเช่น การนำเทอร์โมมิเตอร์ไปวัดอุณหภูมิของน้ำพบว่า

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

$$T = 23 \pm 2.17\%$$

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ คือ 2.17%

2.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสะสมด้วยวิธี Step by Step

กรณีที่ต้องการนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาคำนวณ ซึ่งแต่ละค่าก็มีค่าความคลาดเคลื่อนของตัวเอง จะมีวิธีการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของแต่ละตัวแปร โดยการหาค่า Quadratic Sum ซึ่งเป็นผลรวมของค่าต่างๆ ในที่นี้จะหมายถึงค่าความคลาดเคลื่อนทั้งแบบสัมบูรณ์และสัมพัทธ์ นำมายกกำลังสอง จากนั้นถอดรากที่สอง ดังสมการที่ 10

$$\text{Quadratic Sum} = \sqrt{(\delta x_1)^2 + (\delta x_2)^2 + \ldots + (\delta x_n)^2} \qquad (10)$$

โดยหลักการทำ Quadratic Sum สำหรับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็น 2 กรณี

1. กรณีที่ตัวแปรต้นบวกหรือลบกัน ให้นำค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละตัวแปรต้นมาหาค่า Quadratic Sum

2. กรณีที่ตัวแปรต้นคูณหรือหารกัน ให้นำค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแต่ละตัวแปรต้นมาหาค่า Quadratic Sum

2.4.3 RMSE และ MBD

ก. Root Mean Square Error (RMSE) เป็นค่าที่แสดงถึงรากที่สองของผลต่างกำลังสองเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลอง (M_i) และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง (E_i) ซึ่งจะบ่งบอกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่างจากผลที่ได้จากการตรวจวัดจริง เป็นไปตามสมการที่ 11

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_i - E_i)^2}{N}} \qquad (11)$$

โดยที่

M_i คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E_i คือ ผลจากการทดลอง

N คือ จำนวนข้อมูล

ข. Mean Bias Difference (MBD) เป็นค่าที่แสดงผลต่างโดยเฉลี่ยของข้อมูล ซึ่งทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมากกว่าหรือน้อยกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัดจริง เป็นไปตามสมการ ที่ 12

$$MBD = \frac{\sum (M_i - E_i)}{N} \qquad (12)$$

โดยที่

M_i คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E_i คือ ผลจากการทดลอง

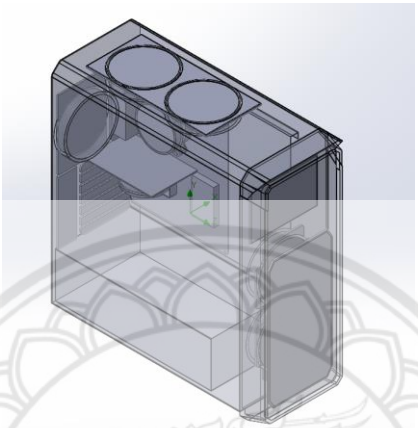
N คือ จำนวนข้อมูล

ซึ่งแบบจำลองที่ออกแบบขึ้นจะสามารถใช้งานได้ก็ต่อเมื่อค่า Root Mean Square Error และ Mean Bias Difference จะต้องมีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum

2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation

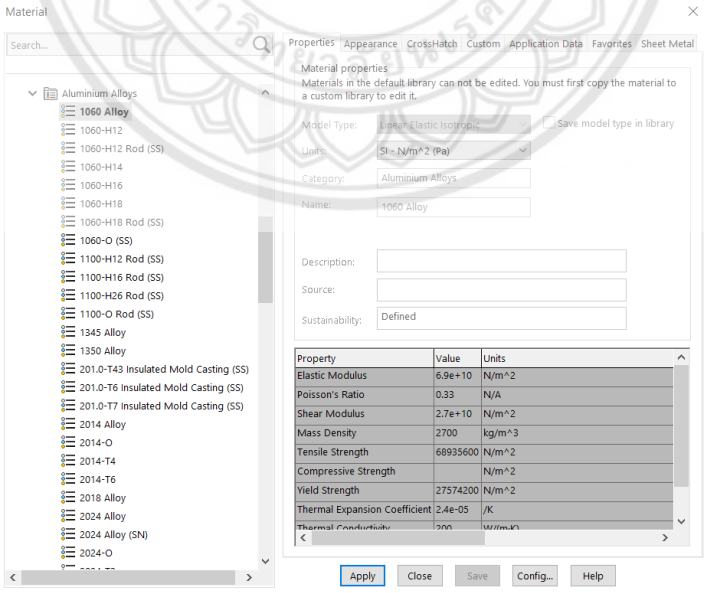
2.5.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์ (Pre – Processing)

ก. การขึ้นรูปแบบจำลอง



รูปที่ 2.6 การขึ้นรูปแบบจำลอง

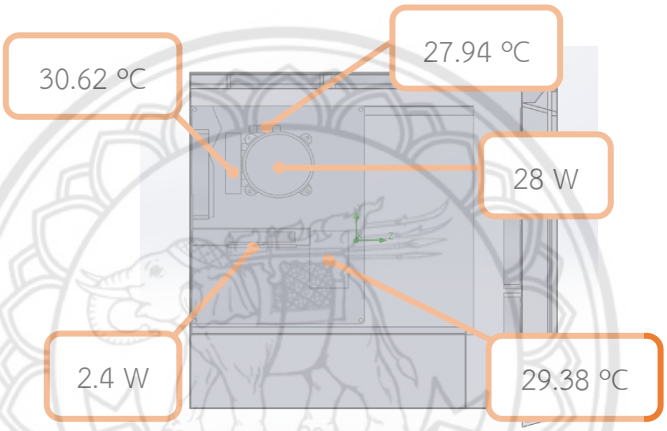
ข. การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้



รูปที่ 2.7 การกำหนดชนิดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

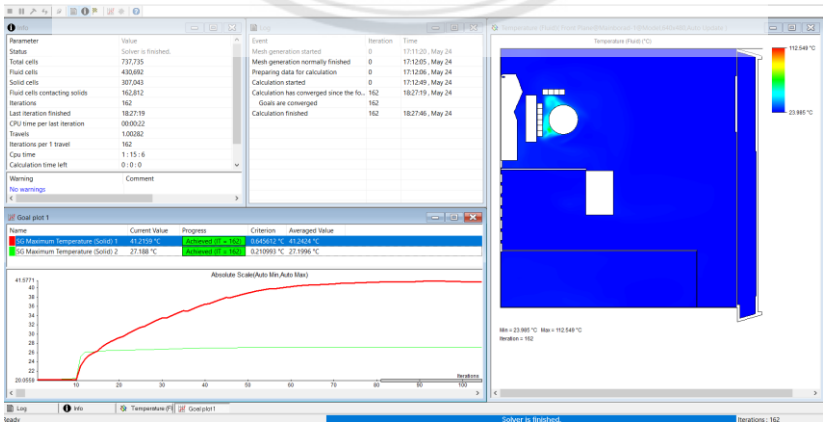
ค. การการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ให้แบบจำลอง โดยในกรณี การศึกษานี้จะกำหนดให้มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัวและ 5 ตัว ที่มีความเร็วรอบ 1100 rpm อุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบอยู่ที่ 24 องศาเซลเซียส และจุดที่มีอากาศสามารถถ่ายเทได้อย่าง อิสระ

ง. การกำหนดชนิดของภาระที่มากระทำกับแบบจำลอง ซึ่งในกรณีศึกษานี้ภาระที่กระทำคือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้าในการทำงานของคอมพิวเตอร์



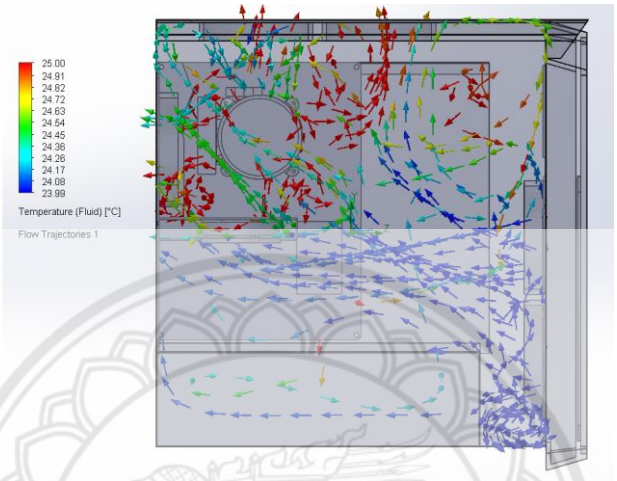
รูปที่ 2.8 กำหนดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ

2.5.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง (Processing)



รูปที่ 2.9 การการวิเคราะห์แบบจำลอง

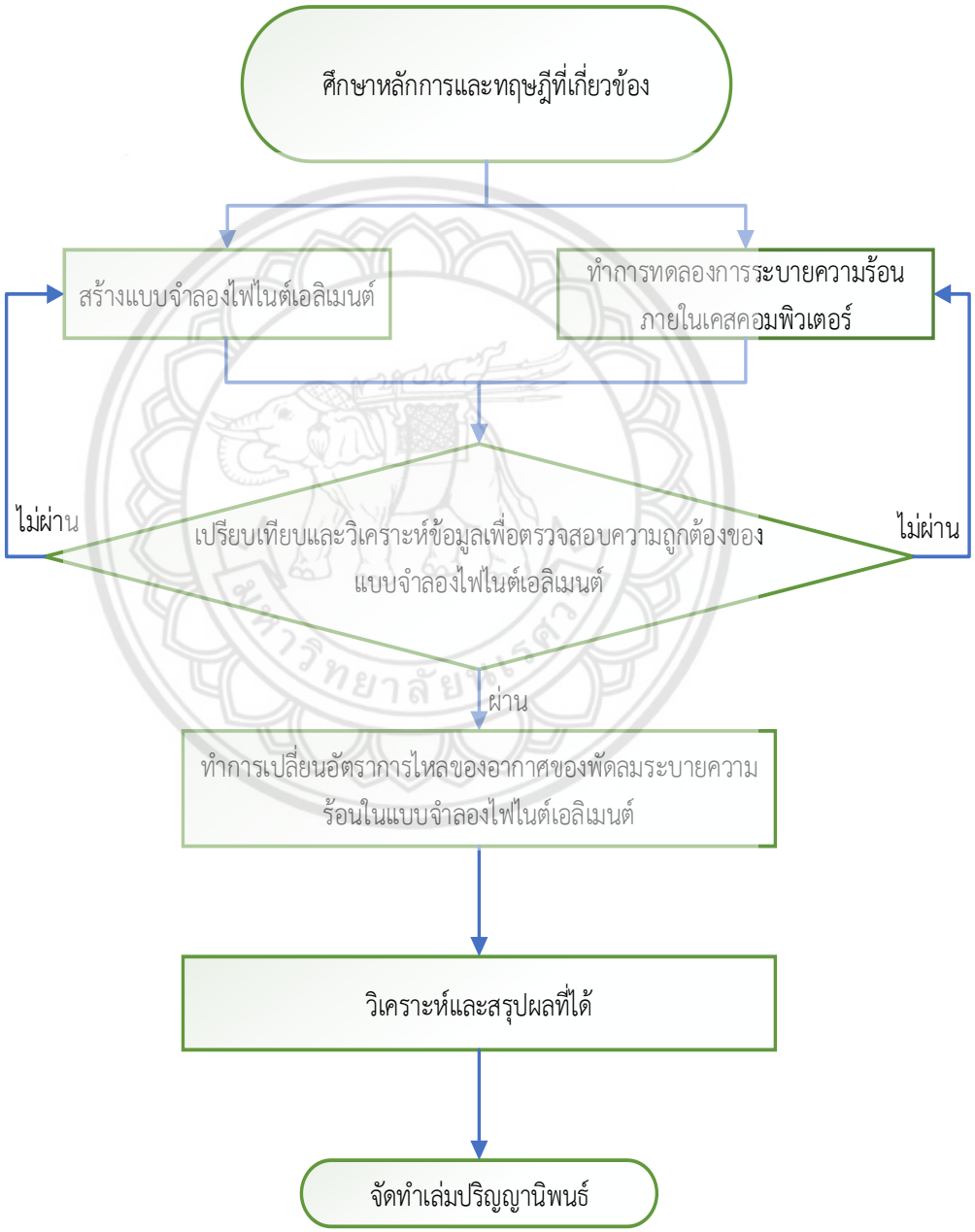
2.5.3 ขั้นตอนของการแสดงผลการวิเคราะห์ (Post-processing) เป็นการนำเอาผลของการวิเคราะห์ที่ได้มาแสดงในรูปของกราฟฟิก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นกรณีที่มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่เข้าด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์ และออกด้านหลังเคสคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.10 แสดงผลการวิเคราะห์

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานของโครงงาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาข้อมูลทฤษฎีและรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน โดยทำการศึกษาดังนี้

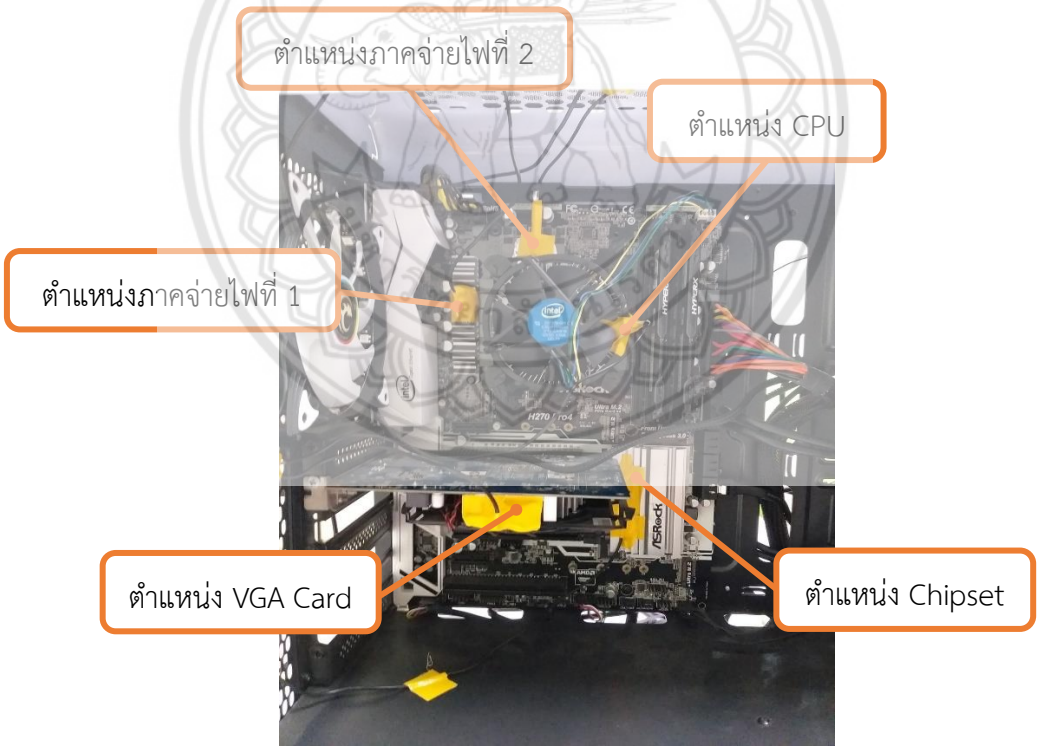
3.1.1 ศึกษาทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.2 ศึกษาทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.1.2 ศึกษาทฤษฎีค่าความคลาดเคลื่อนสะสม

3.2 ทำการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์

การทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ด้วยพัดลมระบายความร้อน โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ของเมนบอร์ดดังรูปที่ 3.2



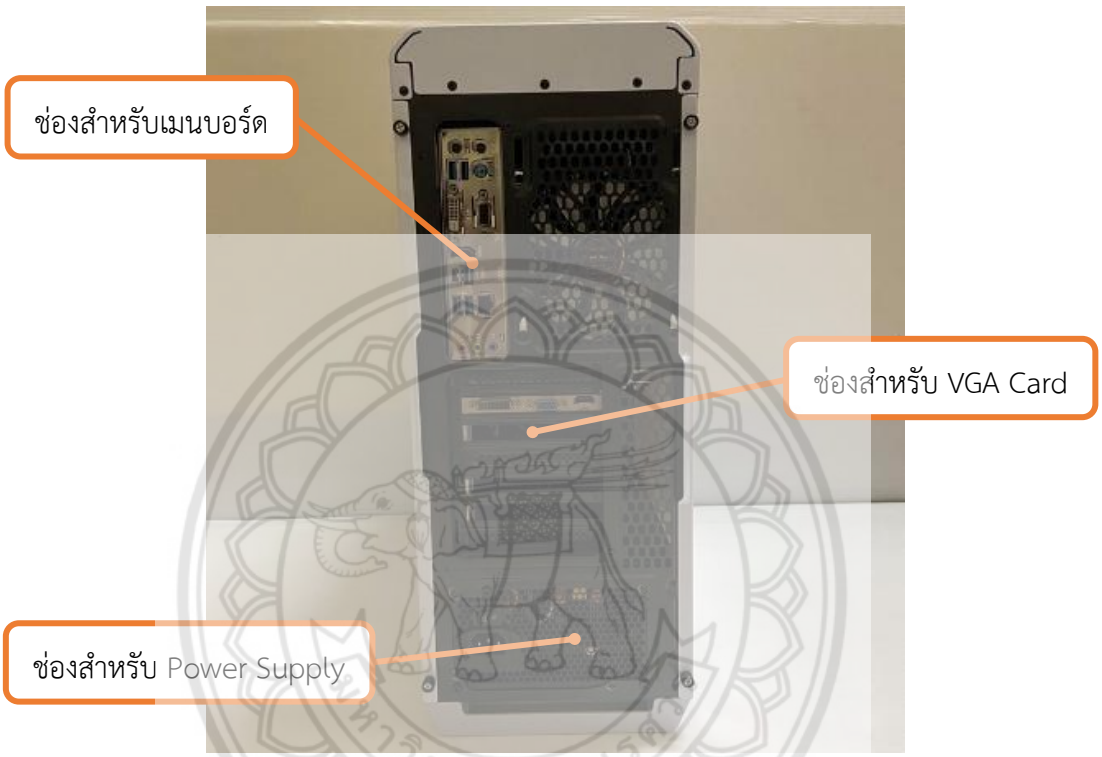
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ

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

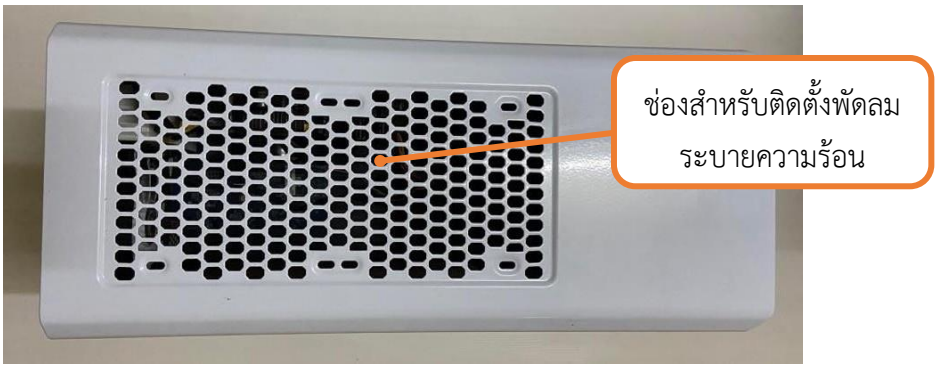
รูปที่ 3.3 ด้านหน้าของเคสคอมพิวเตอร์

ด้านหลังเป็น Steel ชุบเคลือบสีดำ ส่วนบนเป็นรูพรุนสำหรับติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm 1 ตัว และมีช่องสำหรับเมนบอร์ด ส่วนกลางเป็นช่องสำหรับ VGA Card ส่วนล่าง เป็นรูพรุนสำหรับติดตั้ง 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 ℃

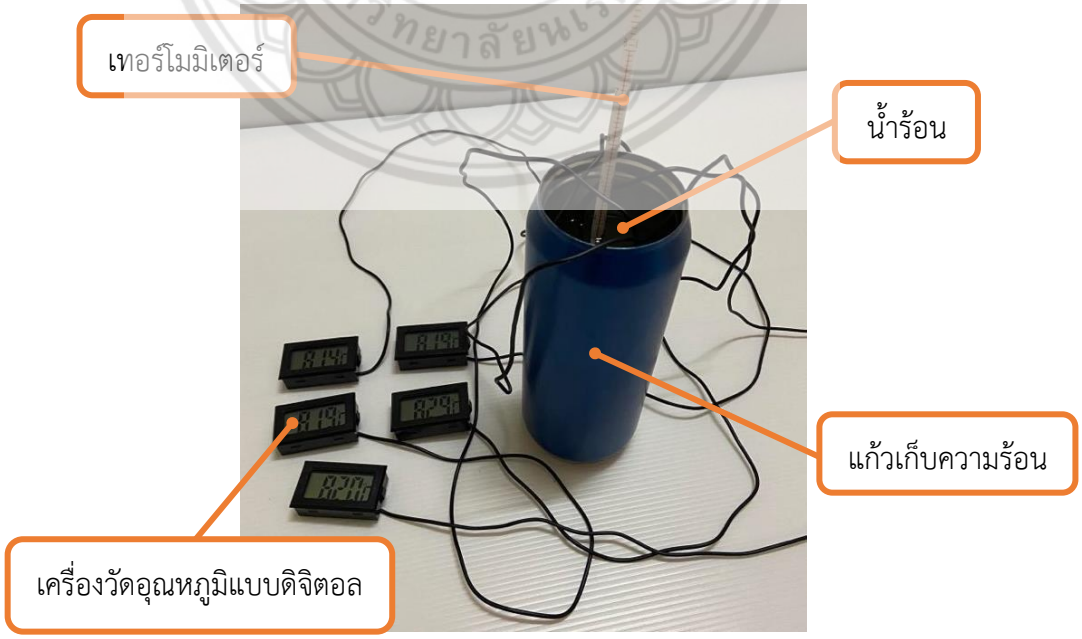
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล

ค. พัดลมระบายความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm ความเร็วรอบ 1100 rpm และอัตราการไหล 28 CFM

รูปที่ 3.8 พัดลมระบายความร้อน

3.2.2 วิธีการทดลองการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ด้วยพัดลมระบายความร้อน

ก. ทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์



รูปที่ 3.9 การทดสอบอุปกรณ์เครื่องวัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์เครื่องวัดอุณหภูมิกับเทอร์โมมิเตอร์

เทอร์โมมิเตอร์ (°C)	ตัววัดอุณหภูมิ ตัวที่ 1 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิ ตัวที่ 2 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิ ตัวที่ 3 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิ ตัวที่ 4 (°C)	ตัววัดอุณหภูมิ ตัวที่ 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

ค่าอุณหภูมิที่ได้จากตารางสามารถหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของตัวเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละตัวได้จากสมการ

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

โดยที่

M คือ ผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

E คือ ผลจากการทดลอง

จะได้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของตัวเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละตัวดังตาราง

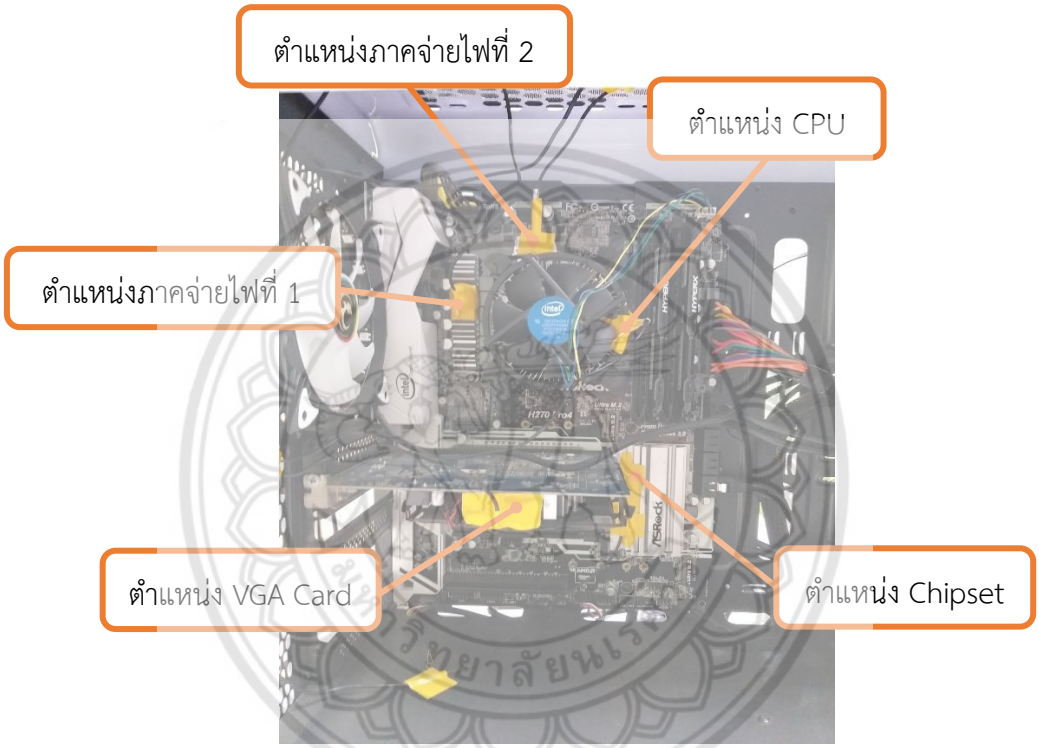
จากการทดลองที่ได้สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมของตัวเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล ซึ่งหาได้จากสมการ

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

นำค่าแทนลงในสมการ จะได้

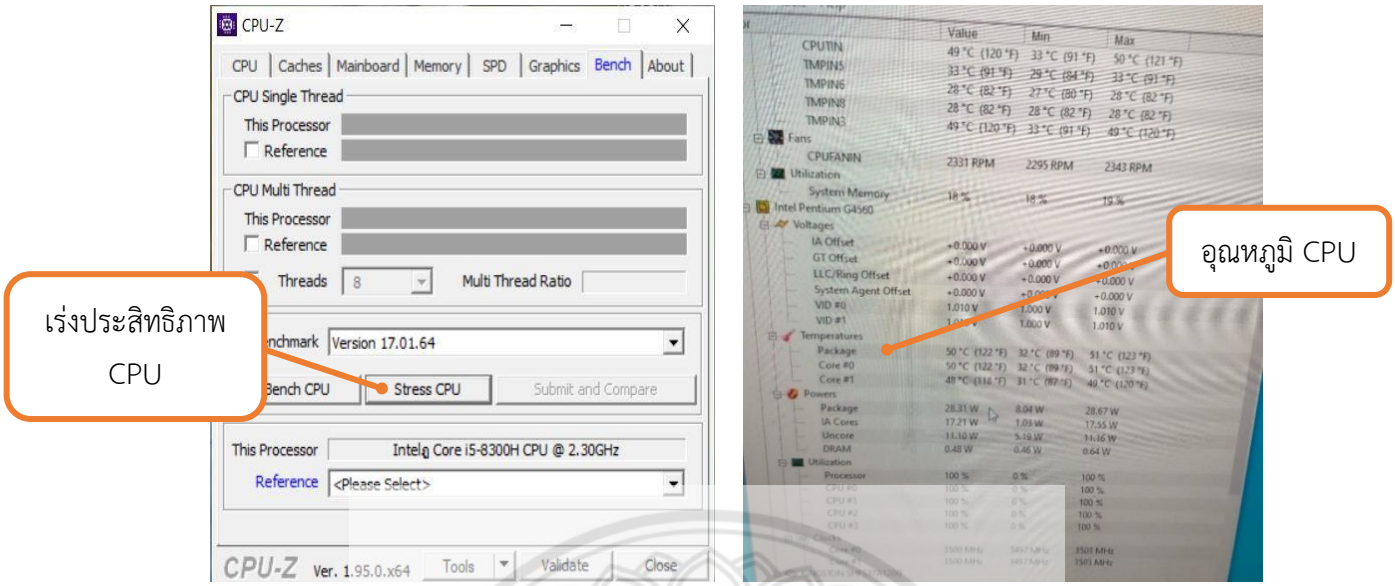
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวม} = \frac{2.66+2.50+2.59+2.69+2.75}{5} = 2.64\%$$

ข. นำอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไปติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ

ค. ทำการใช้งานโปรแกรม CPU-Z เพื่อเร่งภาระการทำงานของ CPU ไปที่ 100 % และเปิดโปรแกรม HWMonitor เพื่อสังเกตและจดบันทึกอุณหภูมิของ CPU



รูปที่ 3.11 การทำงานของ CPU

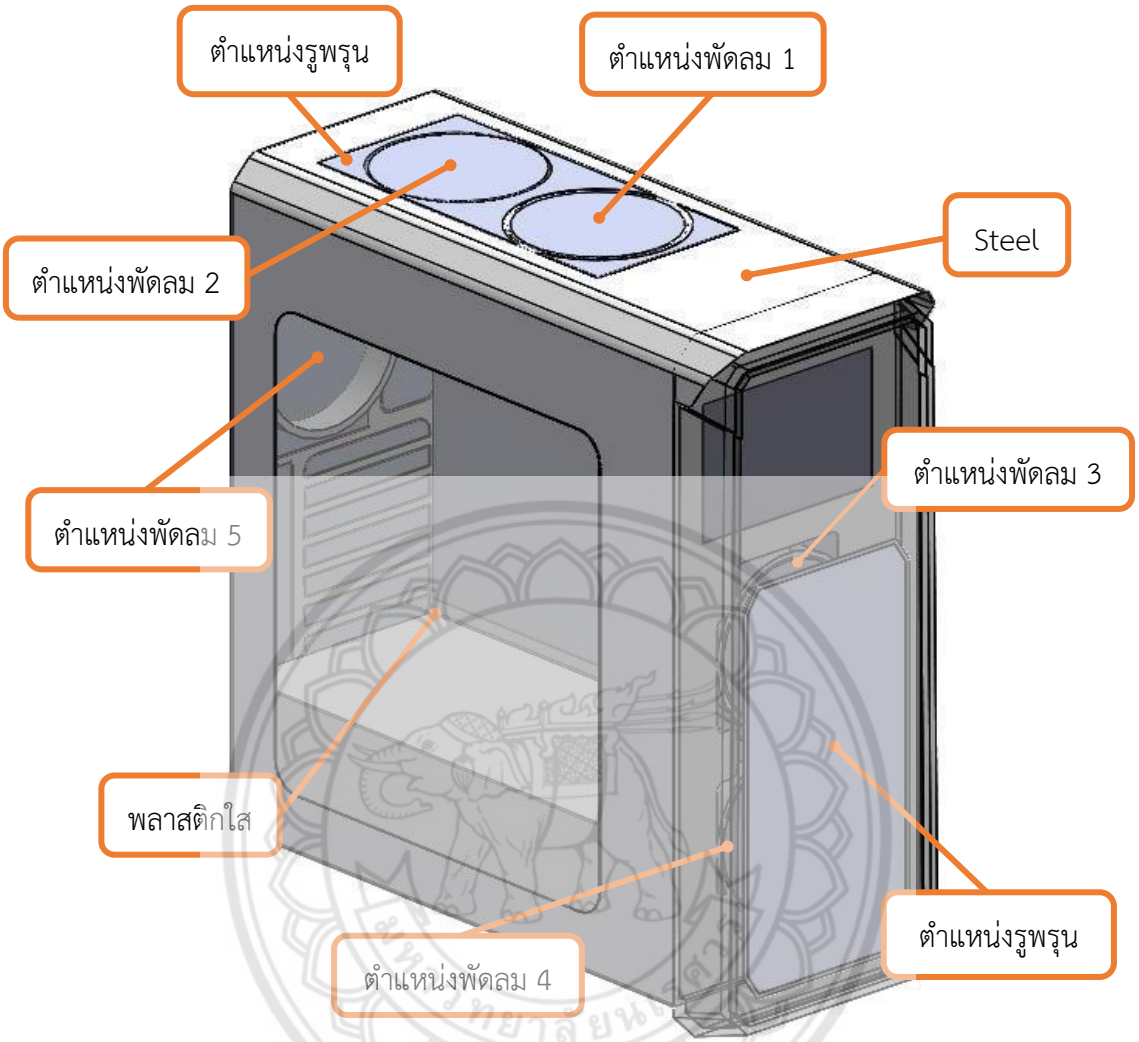
ง. เมื่ออุณหภูมิคงที่ทำการบันทึกผล เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเคสคอมพิวเตอร์

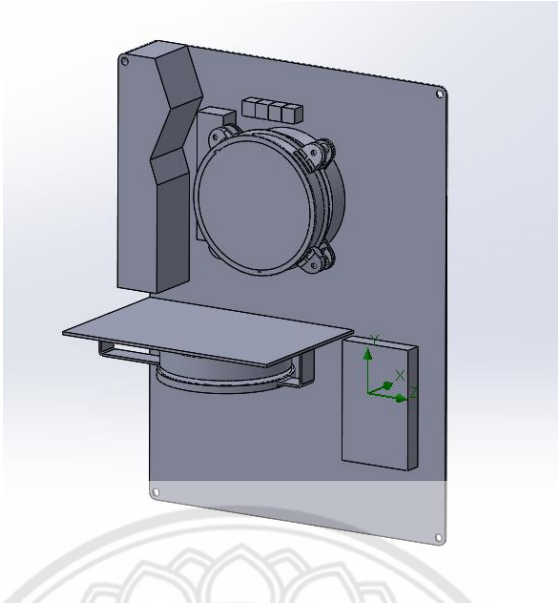
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการสร้างด้วยโปรแกรม Solidworks Flow Simulation โดยมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

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



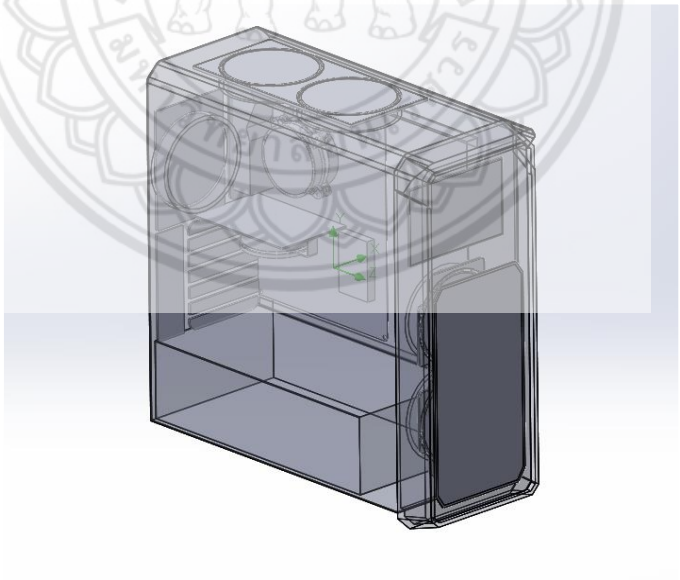
รูปที่ 3.12 เคสคอมพิวเตอร์

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

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	Aluminum
Comments	
Density	2688.9 kg/m^3
Specific heat	(Table)
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	(Table)
Electrical conductivity	Conductor
Resistivity	(Table)
Radiation properties	☐
Melting temperature	☑
Temperature	933.4 K

รูปที่ 3.15 คุณสมบัติของอลูมิเนียม

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	PCB 4-layers
Comments	Demonstration Example
Density	2145 kg/m^3
Specific heat	1136 J/(kg*K)
Conductivity type	Axisymmetrical/Biaxial
Axial (Transverse) thermal conductivity	0.25 W/(m*K)
Radial (In-plane) thermal conductivity	16.5 W/(m*K)
Axial electrical conductivity	Dielectric
Radial electrical conductivity	Dielectric
Radiation properties	☐
Melting temperature	☑
Temperature	1000 K

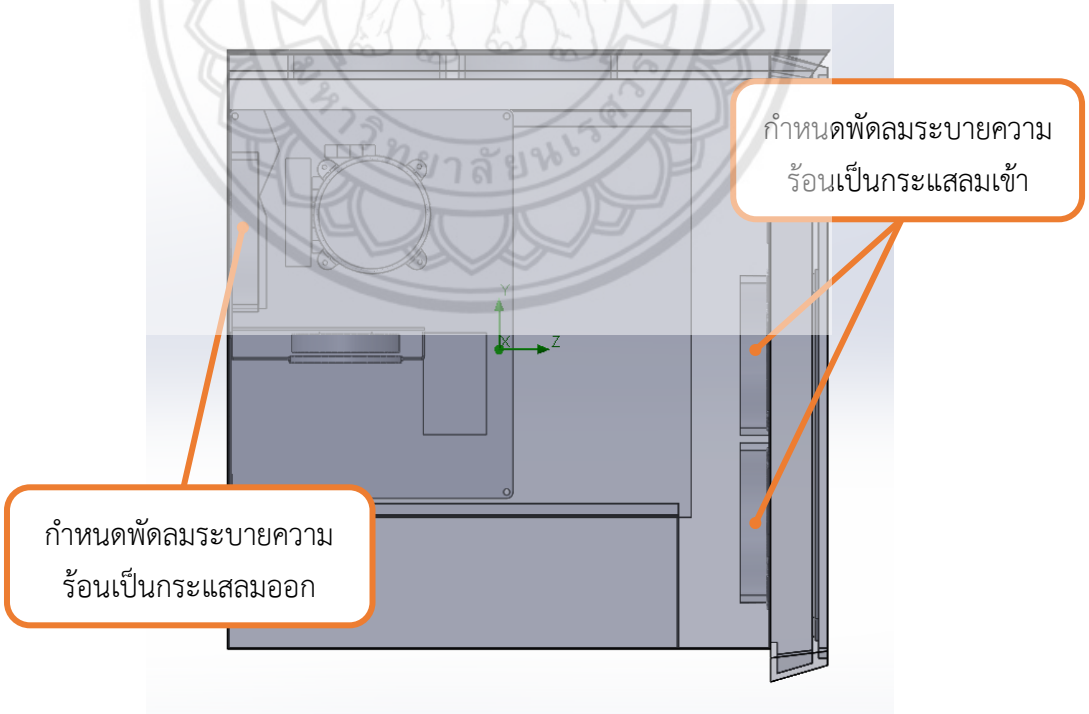
รูปที่ 3.16 คุณสมบัติของ PCB

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

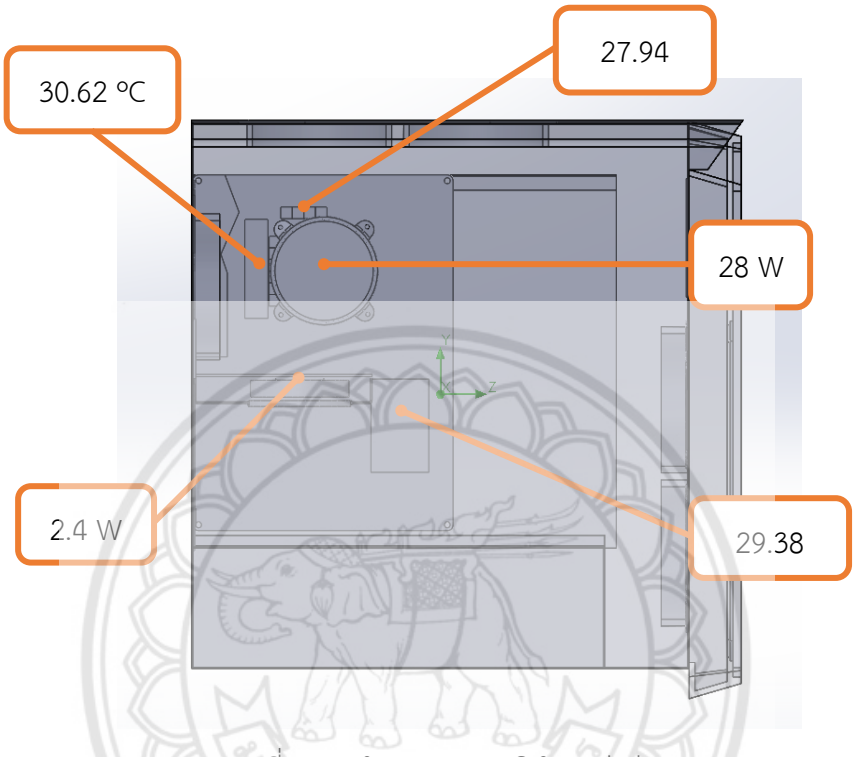
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของซิลิคอน

ข. กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างตำแหน่งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางเข้า-ออกกระแสของลม

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 เนื่องจากตัววัดอุณหภูมิมีความ คลาดเคลื่อนสะสมเฉลี่ยที่ 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นในกรณีศึกษานี้ค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference ต้องน้อยกว่า 1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1.2 ผลการวัดอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จำนวนครั้ง	อุณหภูมิจากการทดลอง : E (°C)	อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟ ไนต์เอลิเมนต์ : M (°C)	M - E	$(M - E)^2$
1	41.32	42.51	1.19	1.42
2	42.56	42.55	0.01	0.00
3	43.17	42.30	0.87	0.76
4	42.63	42.37	0.26	0.07
5	41.84	42.27	0.43	0.18
รวม			2.76	2.43

สามารถคำนวณหาค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference ได้ดังนี้

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

$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{2.43}{5}} = 0.70$$

และ

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

$$\text{Mean Bias Difference} = \frac{2.76}{5} = 0.74$$

จากการคำนวณพบว่าค่า Root Mean Square Error ที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิของ CPU เท่ากับ 0.70 และค่า Mean Bias Difference ที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิภาคจ่ายไฟของ CPU เท่ากับ 0.74 ซึ่งทั้งสองค่ามีค่าน้อยกว่าค่า Quadratic Sum ที่เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงจะสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความถูกต้องและค่าความคลาดเคลื่อนสะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

3.5 เลือกรูปแบบการติดตั้งของพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้าออกของลม

เมื่อได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความถูกต้องแล้ว ทำการเลือกรูปแบบของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้าและออกของกระแสลมโดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ การติดตั้งพัดลม 3 ตัว และการติดตั้งพัดลม 5 ตัว เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของ CPU ที่มีผลกระทบมาจากตำแหน่งการติดตั้งของพัดลมระบายความร้อน และทิศทางการเข้าและออกของกระแสลม

3.6 กำหนดค่าอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อน

เมื่อทำการเลือกรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนแล้ว จากนั้นทำการกำหนดค่าอัตราการไหลของพัดลมระบายความร้อน ตั้งแต่ 10 – 50 CFM เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิของ CPU ที่มีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศในการติดตั้งพัดลมรูปแบบต่างๆ โดยสภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อุณหภูมิภายนอกเคสคอมพิวเตอร์เป็น 24 °C

3.7 วิเคราะห์และสรุปผล

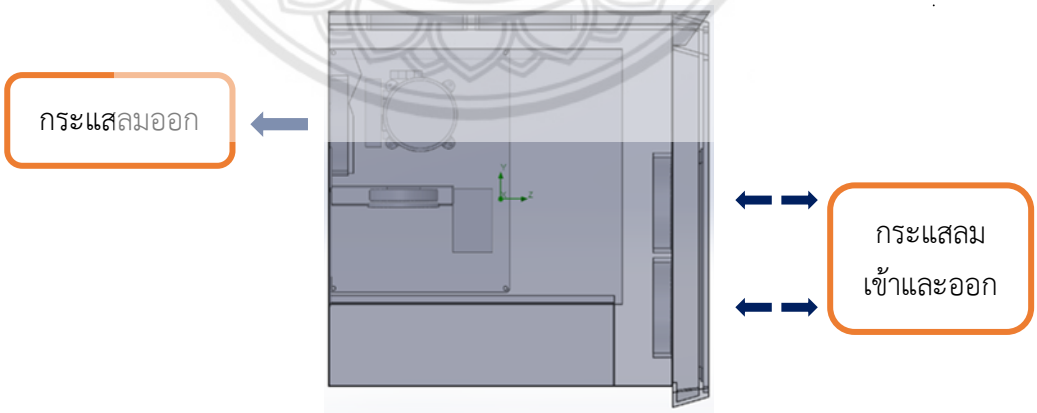
นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกันของการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนและทิศทางการเข้า – ออกของกระแสลมในแต่ละกรณี โดยทำการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 10 – 50 CFM และพิจารณาอัตราการไหลของอากาศใดที่เหมาะสมกับการระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์มากที่สุด

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การระบายความร้อนของเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower โดยเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการไหลของพัดลมขนาด 120 mm ที่ติดตั้งบนตัวเคส ที่มีต่อการระบายความร้อนของ CPU ในการวิเคราะห์จะมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของลมอยู่ในช่วง 10 - 50 CFM การวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีการติดตั้งพัดลมจำนวน 3 ตัว และกรณีการติดตั้งพัดลมจำนวน 5 ตัว

4.1 กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 3 ตัว

การวิเคราะห์การระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower โดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm จำนวน 3 ตัว จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณีย่อย คือ การติดตั้งพัดลม 2 ตัว เป็นคู่ด้านหน้าและคู่ด้านบน ในแต่ละกรณีย่อยจะมีการสลับทิศทางของอากาศไหลเข้าและออก ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

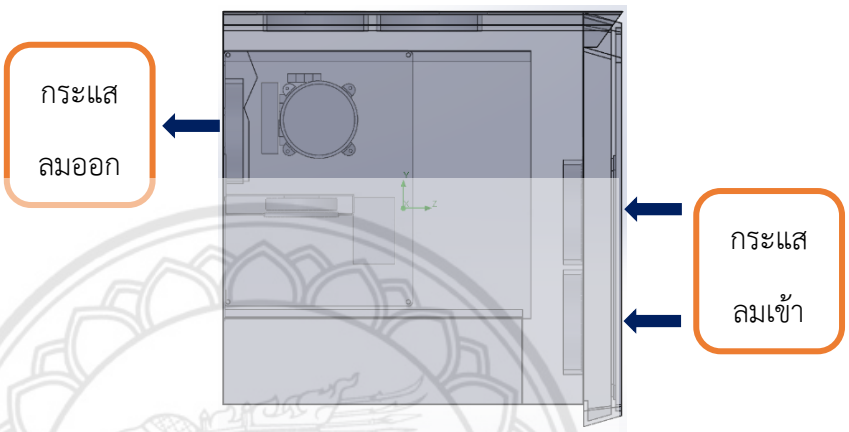
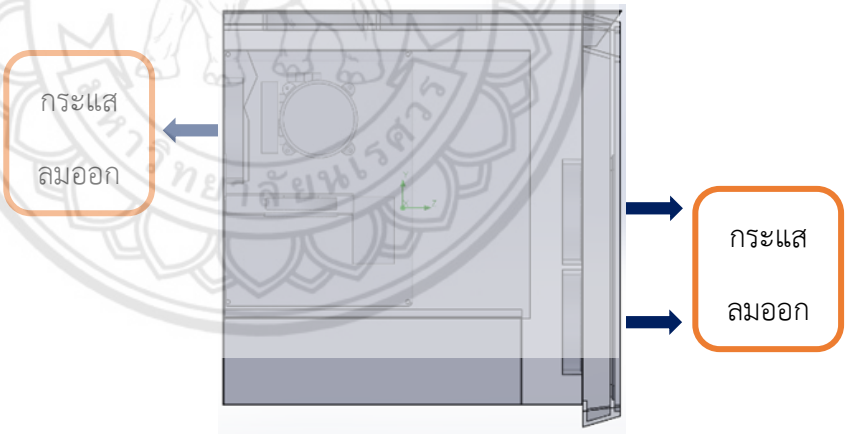


รูปที่ 4.1 แสดงทิศทางการไหลของอากาศ กรณี พัดลมคู่ด้านหน้า

4.1.1 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านหน้า

รูปแบบการติดตั้งพัดลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านหน้า

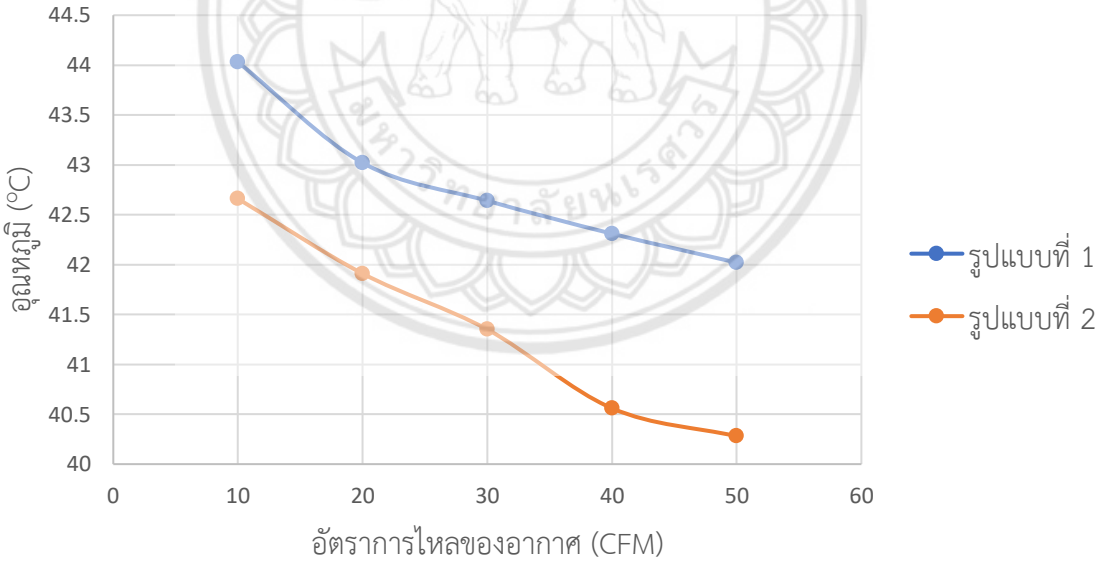
รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 1	
รูปแบบที่ 2	

จากรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความคู่ด้านหน้า ทั้งกระแสลมเข้า และกระแสลม ออกภายนอกเคส เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลของอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

CFM	อุณหภูมิ CPU (°C)	
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2
10	44.03	42.66
20	43.02	41.91
30	42.64	41.35
40	42.31	40.56
50	42.02	40.28

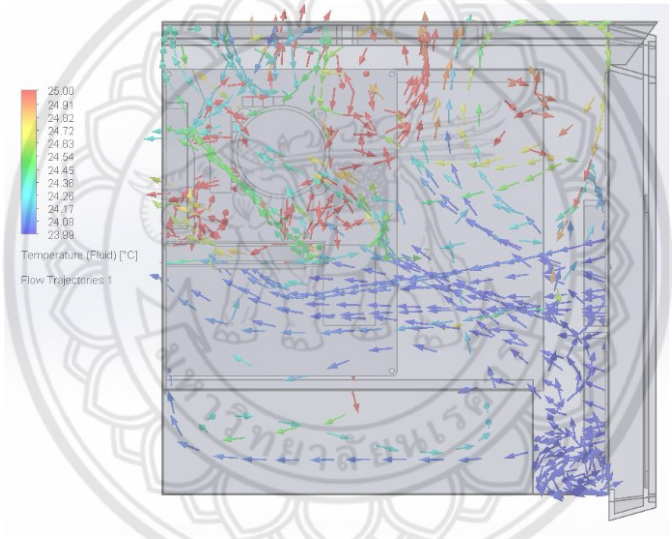
จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้



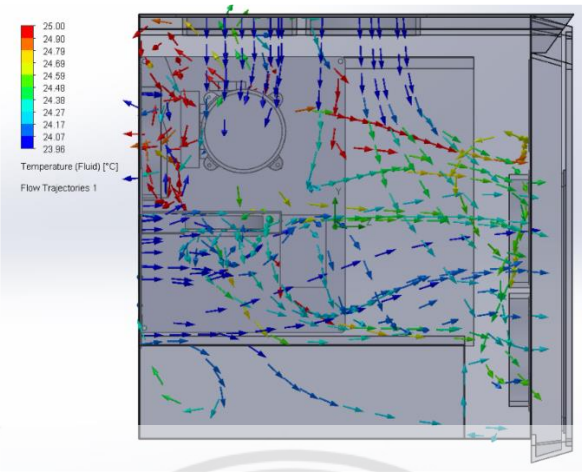
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านหน้า

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 - 50 CFM พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลอุณหภูมิของ CPU มีค่าลดลง

โดยการลดลงดังกล่าวมีแนวโน้มในลักษณะที่คงที่ ดูได้จากความชันของเส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่า 0.5 °C ในทุกๆการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM โดยประมาณ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลอากาศของพัดลมขนาด 120 mm ที่ติดตั้งสำหรับการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์นั้น ส่งผลกระทบน้อยมากในการถ่ายเทความร้อนของ CPU และเมื่อพิจารณาทิศทางการไหลเข้า - ออกของอากาศ จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้ พบว่า ในการติดตั้งพัดลม 2 ตัว เป็นคู่ด้านหน้า เมื่อติดตั้งพัดลมให้มีทิศทางดูดอากาศภายในเคสออก (รูปแบบที่ 2) จะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่าการดูดอากาศเข้าภายในเคส (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณี พัดลมคู่ด้านหน้ากระแสลมเข้า (รูปแบบที่ 1) ที่อัตราการไหล 50 CFM

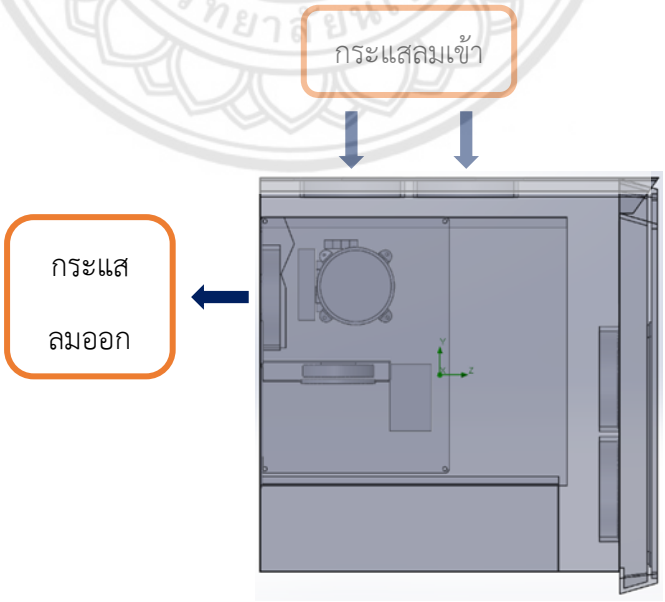


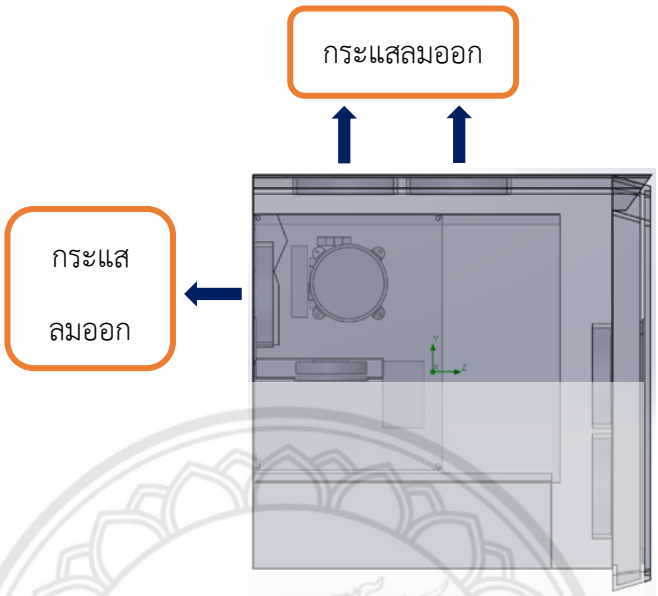
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณี พัดลมคู่ด้านหน้ากระแสลมออก (รูปแบบที่ 2) ที่อัตราการไหล 50 CFM

4.1.2 การติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านบน

รูปแบบการติดตั้งพัดลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านบน

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 3	

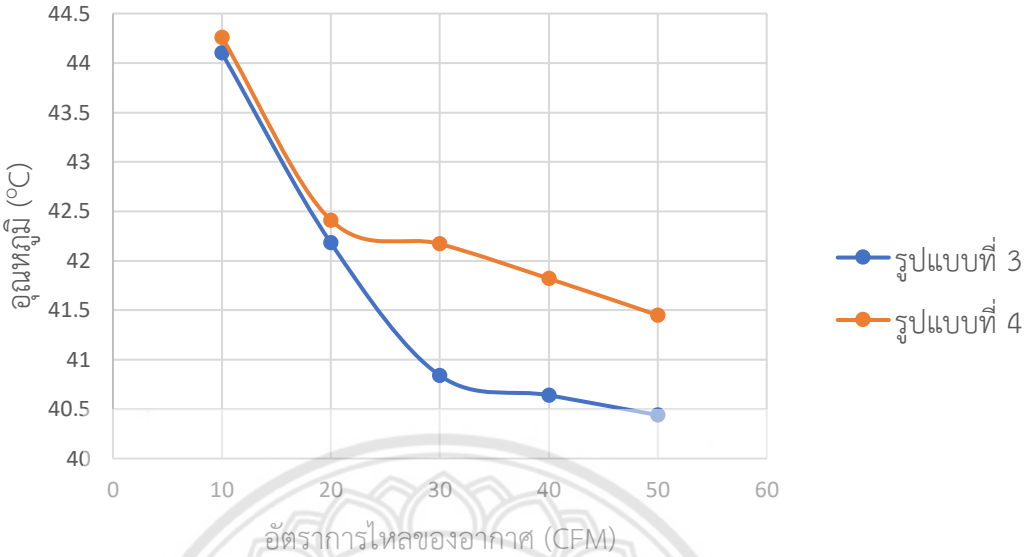
รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 4	

จากรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความคู่ด้านบน ทั้งกระแสลมเข้าและกระแสลมออกภายนอกเคส เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลของอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

CFM	อุณหภูมิ CPU (°C)	
	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4
10	44.10	44.26
20	42.18	42.41
30	40.84	42.17
40	40.64	41.82
50	40.44	41.45

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.4 สามารถนำมาแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้



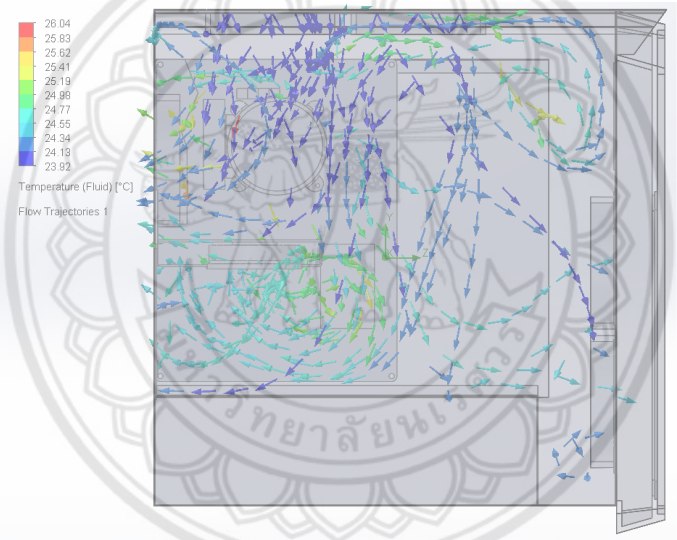
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนคู่ด้านบน

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 - 50 CFM พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้อุณหภูมิของ CPU มีค่าลดลง โดยการลดลงดังกล่าวจะพิจารณาจากเส้นกราฟของการติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 3 และพัดลมรูปแบบที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.5

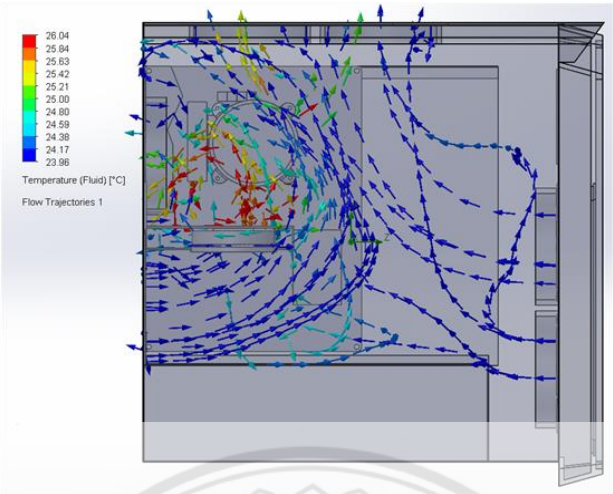
การติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 3 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 - 30 CFM พบว่ากราฟมีความชันมาก อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น การลดลงของอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าประมาณ 2 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM และช่วงอัตราการไหลของอากาศ 30 - 50 CFM พบว่ากราฟมีความชันน้อยลง การลดลงของอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 0.2 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM

การติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 4 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 - 20 CFM พบว่ากราฟมีความชันมาก อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น การลดลงของอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าประมาณ 2 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM และในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 20 - 50 CFM พบว่ากราฟมีความชันน้อย การลดลงของอุณหภูมิมีค่าประมาณ 0.3 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศของพัดลมขนาด 120 mm ที่ติดตั้งสำหรับการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์นั้น ส่งผลกระทบน้อยมากในการถ่ายเทความร้อนของ CPU ที่ อัตราการไหลของอากาศ 30 - 50 CFM (สำหรับการติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 3) และ 20 - 50 CFM (สำหรับการติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 4) เมื่อพิจารณาทิศทางการไหลเข้าและออกของอากาศจากข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้ พบว่าในการติดตั้งพัดลม 2 ตัว เป็นคู่ด้านบน เมื่อติดตั้งพัดลมให้มีทิศทางดูดอากาศเข้าภายในเคส (รูปแบบที่ 3) จะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่าการดูดอากาศภายในเคสออก (รูปแบบที่ 4)



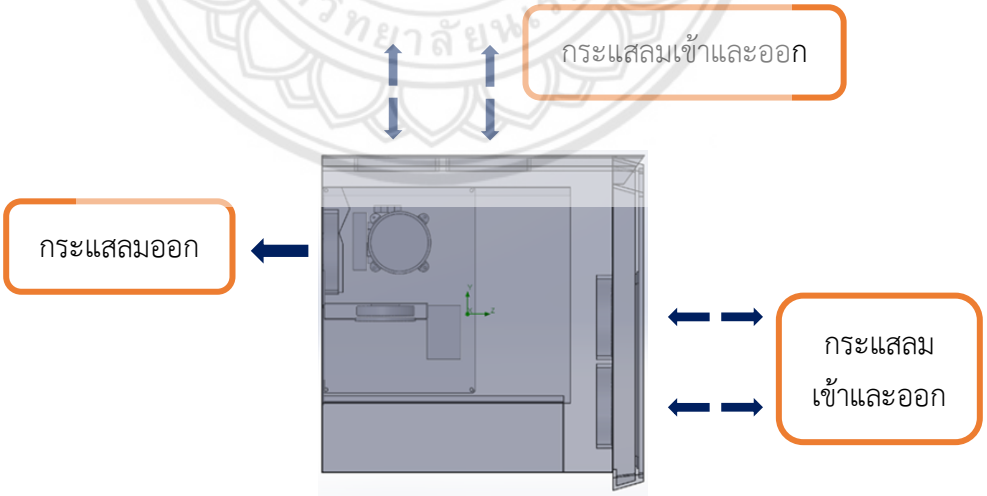
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณี พัดลมคู่ด้านบนกระแสลมเข้า (รูปแบบที่ 3) ที่อัตราการไหล 50 CFM



รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศ
กรณี พัดลมคู่ด้านบนกระแสลมออก (รูปแบบที่ 4) ที่อัตราการไหล 50 CFM

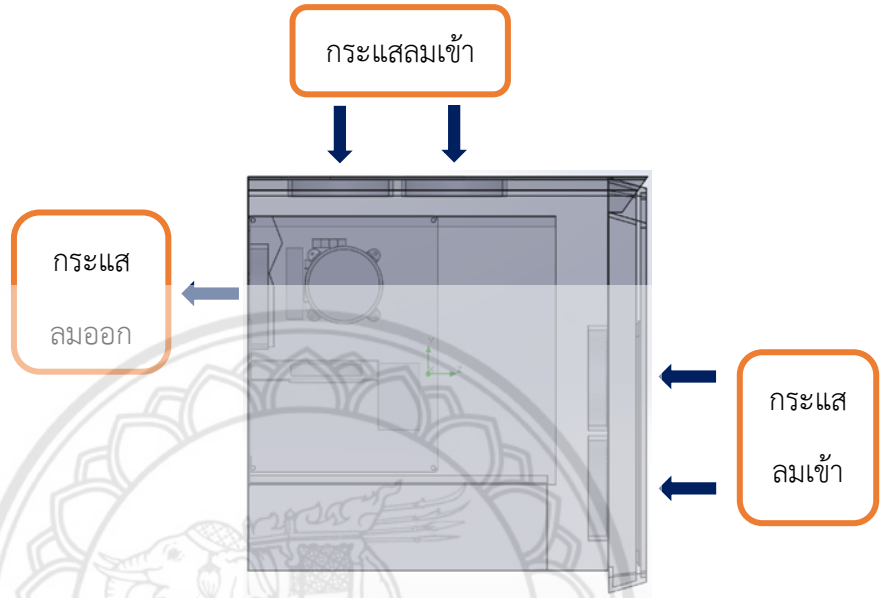
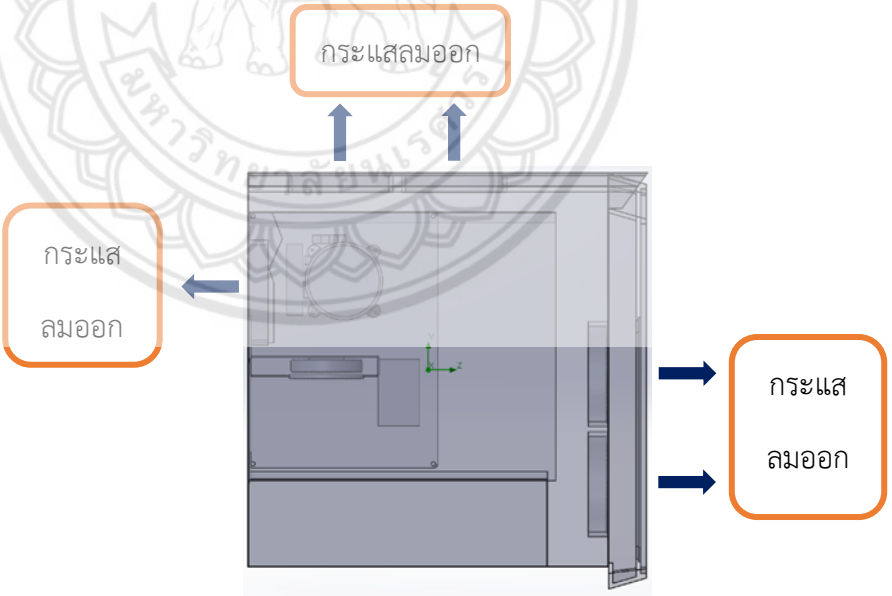
4.2 กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

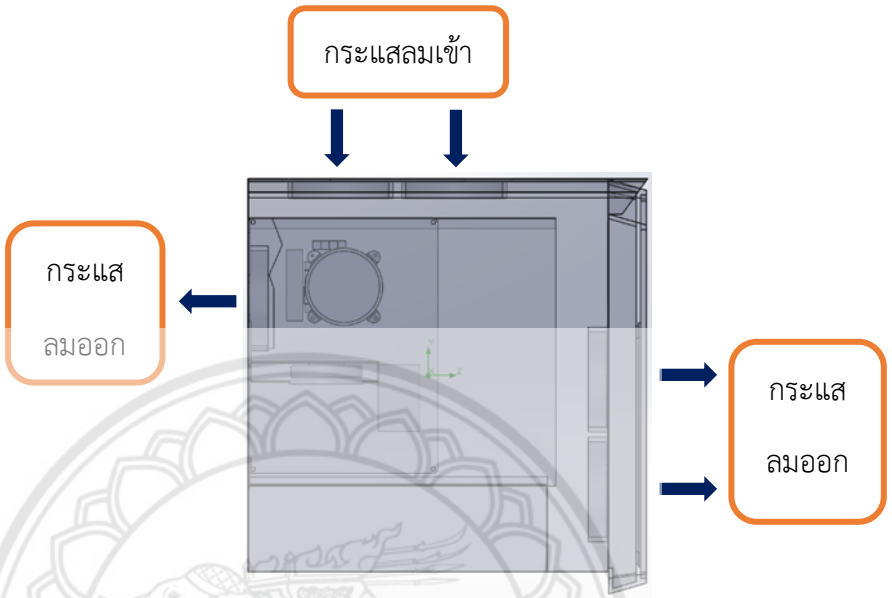
การวิเคราะห์การระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-Tower โดยการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm จำนวน 5 ตัว จะวิเคราะห์โดยการสลับทิศทางของอากาศไหลเข้าและออก ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



รูปที่ 4.8 แสดงทิศทางการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงลักษณะการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 1	
รูปแบบที่ 2	

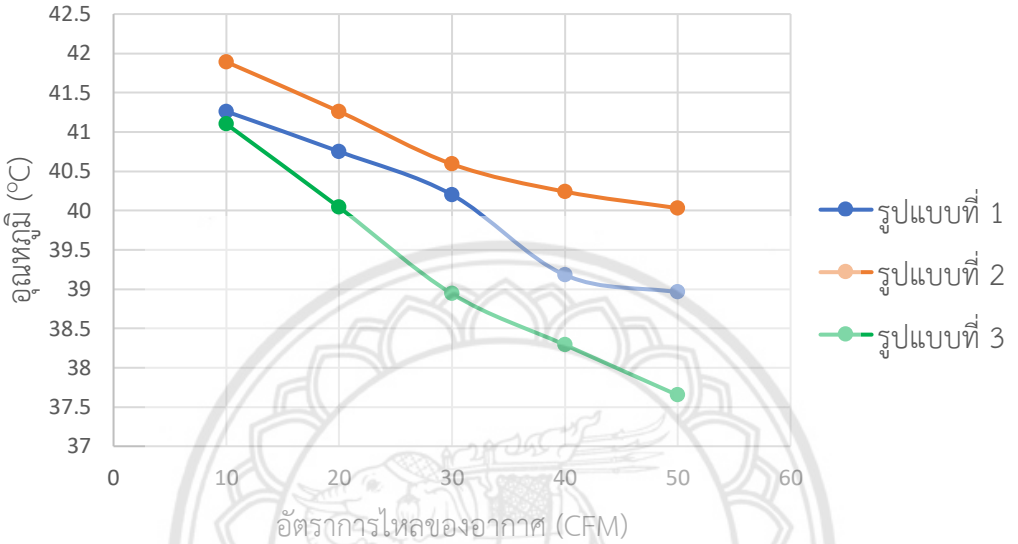
รูปแบบ	การติดตั้งพัดลมระบายความร้อน
รูปแบบที่ 3	

จากรูปแบบการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว ทั้งกระแสลมเข้าและกระแสลมออกภายนอกเคส เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ผลของอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้

ตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิของ CPU ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

CFM	อุณหภูมิ CPU (°C)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
10	41.26	41.89	41.10
20	40.75	41.26	40.04
30	40.20	40.59	38.94
40	39.18	40.24	38.29
50	38.96	40.03	37.65

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.6 สามารถนำมาแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละอัตราการไหลของพัดลม ดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ CPU ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 - 50 CFM พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้อุณหภูมิของ CPU มีค่าลดลง โดยการลดลงดังกล่าวจะพิจารณาจากเส้นกราฟของการติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 1 พัดลมรูปแบบที่ 2 และพัดลมรูปแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.9

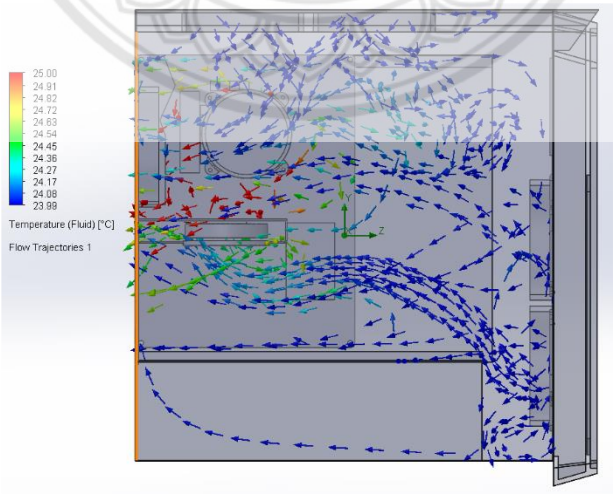
การติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 1 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 - 40 CFM พบว่ากราฟมีความชันคงที่ การลดลงของอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.7 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM และช่วงอัตราการไหลของอากาศ 40 - 50 CFM พบว่ากราฟมีความชันน้อยกว่าช่วง 10 - 40 CFM การลดลงของอุณหภูมิมีค่าประมาณ 0.22 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM

การติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 2 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 - 30 CFM พบความชันของกราฟมีแนวโน้มในลักษณะที่คงที่ ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิ CPU จะมีค่า 0.6 °C ในทุกๆการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM โดยประมาณ และ

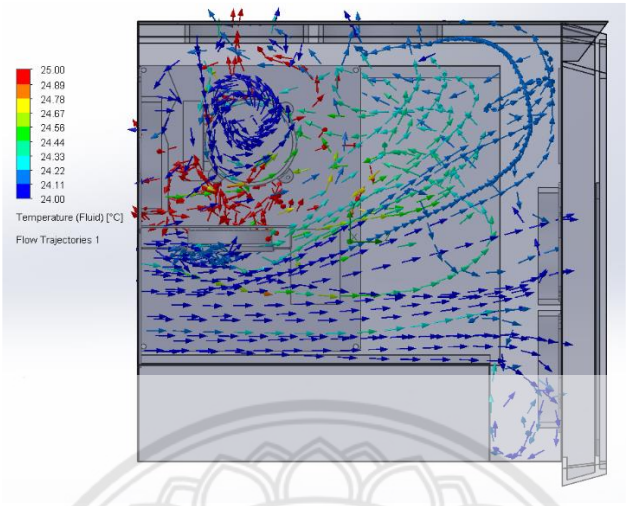
ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 30 - 50 CFM พบว่ากราฟมีความชันน้อยกว่าช่วง 10 - 30 CFM ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิจะมีค่าประมาณ 0.25 °C ต่อการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM

การติดตั้งพัดลมรูปแบบที่ 3 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการไหลของอากาศ 10 - 30 CFM พบความชันของกราฟมีแนวโน้มในลักษณะที่คงที่ การลดลงของอุณหภูมิ CPU มีค่าประมาณ 1.1 °C ต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM โดยประมาณ และช่วงอัตราการไหลของอากาศ 30 - 50 CFM พบความชันของกราฟมีแนวโน้มในลักษณะที่คงที่ มีความชันน้อยกว่าช่วง 10 - 30 CFM ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิ CPU จะมีค่าประมาณ 0.6 °C ต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ 10 CFM

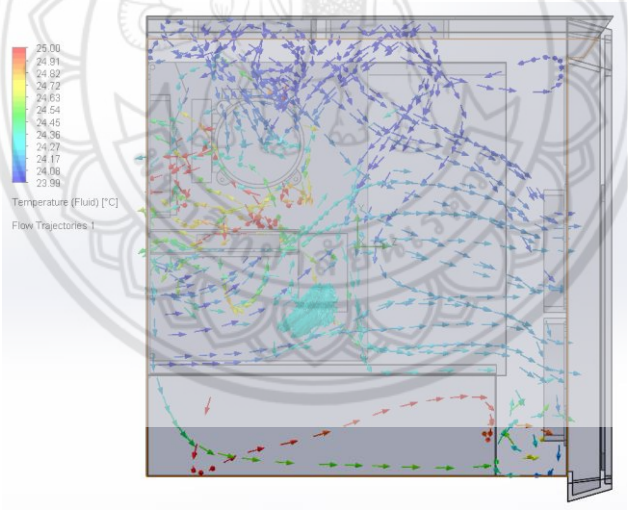
ดังนั้นเมื่อพิจารณาการติดตั้งพัดลมทั้ง 3 รูปแบบจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศของพัดลมขนาด 120 mm ที่ติดตั้งสำหรับการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์นั้นส่งผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของ CPU ส่วนใหญ่ที่ค่าอัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 CFM ซึ่งหากอัตราการไหลของอากาศมากกว่า 30 CFM จะส่งผลกระทบน้อยมากในการถ่ายเทความร้อนของ CPU และเมื่อพิจารณาทิศทางการไหลเข้าและออกของอากาศ จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า ในการติดตั้งพัดลม 2 ตัว ทั้งคู่ด้านบนและคู่ด้านหน้า เมื่อติดตั้งพัดลมให้มีทิศทางดูดอากาศเข้าของพัดลมคู่ด้านบนและการดูดอากาศภายในเคสออกของพัดลมคู่ด้านหน้า (รูปแบบที่ 3) จะให้ผลการระบายความร้อนที่ดีกว่ารูปแบบที่ 1 คือการดูดอากาศเข้าภายในเคสของพัดลมคู่ด้านบนและพัดลมคู่ด้านหน้า และรูปแบบที่ 2 คือการดูดอากาศภายในเคสออกของพัดลมคู่ด้านบนและพัดลมคู่ด้านหน้า



รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 1) ที่อัตราการไหล 50 CFM



รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 2) ที่อัตราการไหล 50 CFM



รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิและทิศทางการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อน 5 ตัว (รูปแบบที่ 3) ที่อัตราการไหล 50 CFM

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลของการระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการทดลองจริงและจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อนขนาด 120 mm ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ CPU สามารถสรุปผลได้ตามขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

5.1.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการคำนวณหาค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่า Quadratic Sum ที่มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจากการคำนวณได้ค่า Root Mean Square Error ของ CPU เท่ากับ 0.70 และค่า Mean Bias Difference ของ CPU เท่ากับ 0.74 ซึ่งค่า Root Mean Square Error และค่า Mean Bias Difference มีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

5.1.2 การวิเคราะห์การระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์กรณีติดตั้งพัดลม 3 ตัว

ผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของ CPU กรณีติดตั้งพัดลม 3 ตัว แบ่งเป็น 2 กรณีย่อย ดังนี้

ก. กรณีติดตั้งพัดลมคู่ด้านหน้า พบว่าการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศมีผลกระทบน้อยมากในการถ่ายเทความภายในเคสคอมพิวเตอร์ และหากต้องการติดตั้งพัดลมคู่ด้านหน้าควรเลือกพัดลมที่มีอัตราการไหลของอากาศมากๆ เนื่องจากบริเวณที่ติดตั้งพัดลมอยู่ห่างจากบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (CPU) จึงควรเลือกการติดตั้งพัดลมที่ดูดอากาศออกนอกเคส เพราะส่งผลให้อากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับการ์ดแสดงผล (GPU) ไม่ไหลขึ้นไปสะสมด้านบนบริเวณ CPU ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แต่การติดตั้งพัดลมที่ดูดอากาศเย็นเข้าในเคส ส่งผลให้อากาศที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับการ์ดแสดงผล ไหลขึ้นไปสะสมอยู่ที่บริเวณ CPU ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ดังนั้นการติดตั้งพัดลมคู่ด้านหน้าที่ดูดอากาศออกมีการถ่ายเทความร้อนของ CPU ที่ดีกว่าการติดตั้งพัดลมที่ดูดอากาศเข้าในเคส

ข. กรณีติดตั้งพัดลมคู่ด้านบน พบว่าการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศมีผลกระทบมากในการถ่ายเทความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 CFM และมีผลกระทบน้อยมากที่อัตราการไหลของอากาศ 30 – 50 CFM ดังนั้นอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ คือ อัตราการไหลของอากาศ 30 CFM ขึ้นไป และควรติดตั้งโดยให้พัดลมดูดอากาศเย็นเข้าเคส เพราะบริเวณที่ติดตั้งพัดลมใกล้กับบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (CPU) ทำให้อากาศเย็นที่ไหลเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนกับ CPU โดยตรง ดังในรูปที่ 4.6 แต่การติดตั้งโดยให้พัดลมดูดอากาศออกนอกเคส จะทำให้อากาศอุณหภูมิสูงที่มาจากการแลกเปลี่ยนความร้อนกับการ์ดแสดงผล ไหลผ่านไปยังบริเวณ CPU ดังในรูปที่ 4.7 จึงทำให้การติดตั้งโดยให้พัดลมดูดอากาศเย็นเข้าเคสจึงเหมาะกว่าการติดตั้งโดยให้พัดลมดูดอากาศร้อนออกนอกเคส

5.1.3 การวิเคราะห์การระบายความร้อนภายในเคสคอมพิวเตอร์กรณีติดตั้งพัดลม 5 ตัว

ผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศของพัดลมระบายความร้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิของ CPU กรณีติดตั้งพัดลม 5 ตัว พบว่า การเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศมีผลกระทบค่อนข้างมากในการถ่ายเทความภายในเคสคอมพิวเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศ 10 – 30 CFM และมีผลกระทบน้อยมากที่อัตราการไหลของอากาศ 30 – 50 CFM ดังนั้นอัตราการไหลของอาศที่เหมาะสมกับการระบายความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ คือ อัตราการไหลของอากาศ 30 CFM ขึ้นไป และควรติดตั้งพัดลมคู่ด้านบนดูดอากาศเย็นเข้า และติดตั้งพัดลมคู่ด้านหน้าดูดอากาศเย็นออกนอกเคส เพราะส่งผลให้อากาศเย็นเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับ CPU โดยตรง และอากาศที่แลกเปลี่ยนความร้อนผ่านการ์ดแสดงผล ไหลออกไปนอกเคสโดยที่ไม่ผ่านบริเวณ CPU ดังในรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นการติดตั้งที่ให้ผลดีที่สุดสำหรับการระบายความร้อนกรณีตัดตั้งพัดลม 5 ตัว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรมีสมรรถนะสูง เพื่อความรวดเร็วและความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.2 ปรับปรุงรายละเอียดของโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการเพิ่มอิทธิพลของพัดลมระบายความร้อนของ CPU

เอกสารอ้างอิง

[1] นายธนวัฒน์ กลมไล นางสาวมนัสวี พันธ์งอก นายวสุนรัตน์ สุยะ. (2562). **การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.** มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

[2] ผศ. นพรัตน์ สีหะวงษ์ (ผู้บรรยาย). ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. **การเรียนรู้เพิ่มเติมเรื่องระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.** (บทที่ 1-3)

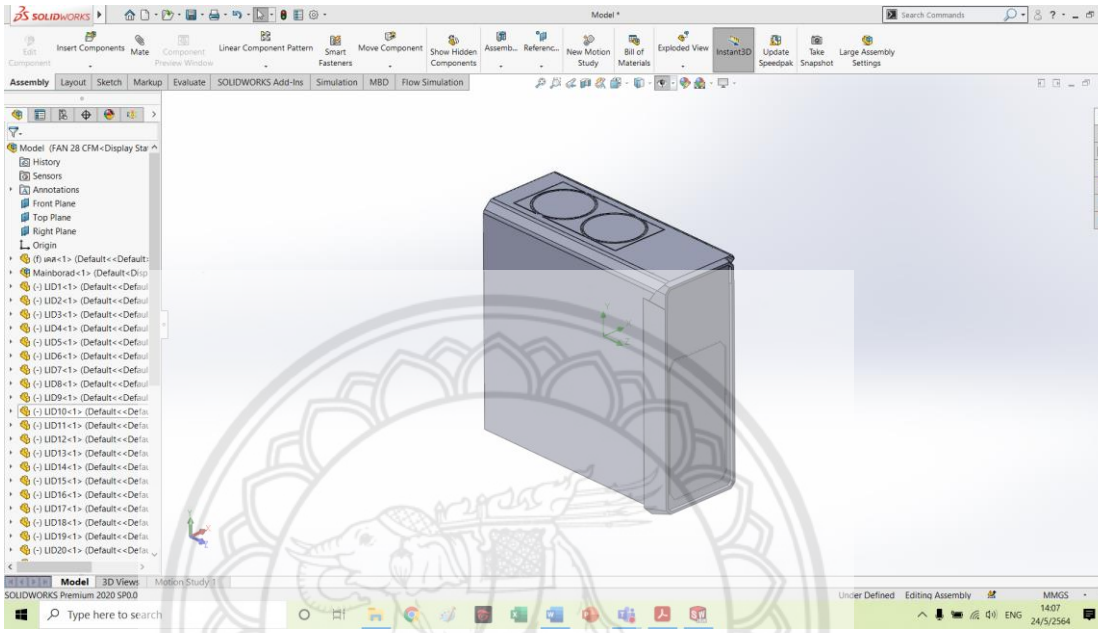
[3] นายพลวัฒน์ ไพรไพศาลกิจ. **Solidworks Flow Simulation.** สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2563 จาก http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/

[4] ผศ. ทสพล เขตเจนการ (ผู้บรรยาย). Basic Error Analysis. **ความคลาดเคลื่อนสะสม.**

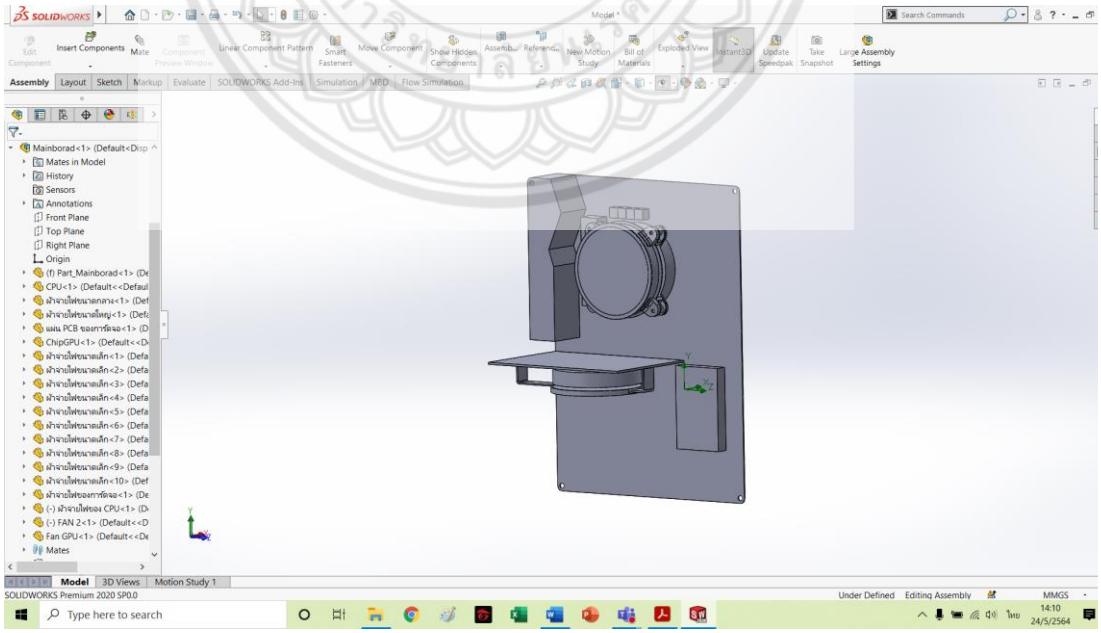
ภาคผนวก ก
วิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation

วิธีและขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Solidworks

แบบจำลองเคสคอมพิวเตอร์ขนาด Mid-tower ประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วนดังรูป



เคสคอมพิวเตอร์



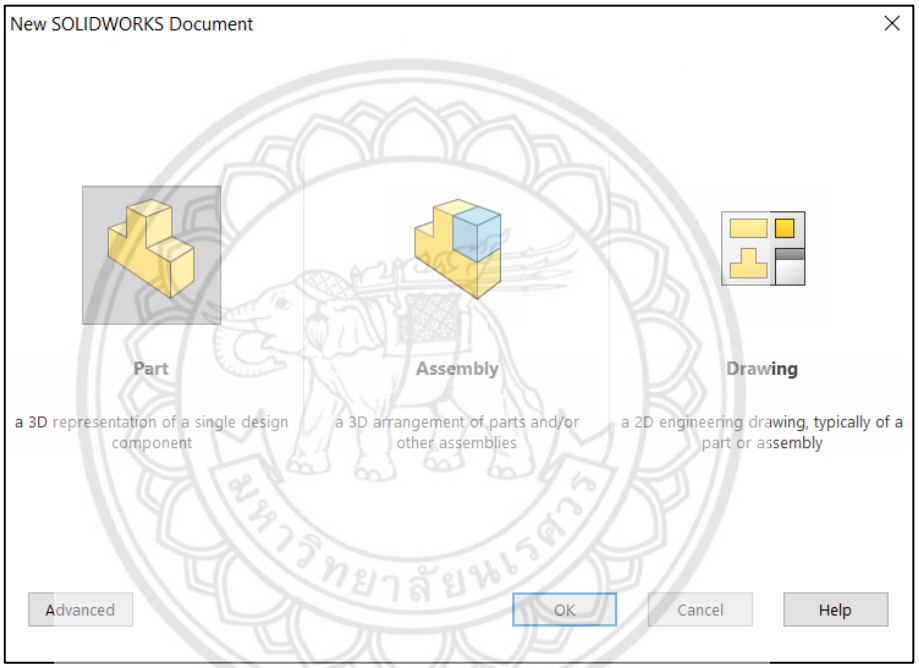
เมนบอร์ด

การสร้างเคสคอมพิวเตอร์

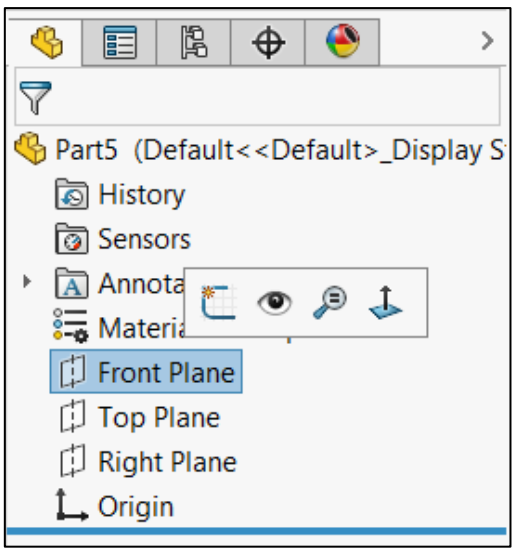
1. การสร้างตัวเคส

1.1 คลิก New เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

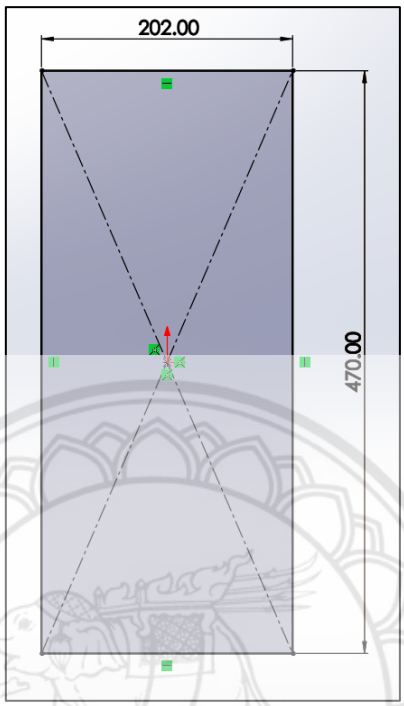
1.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D



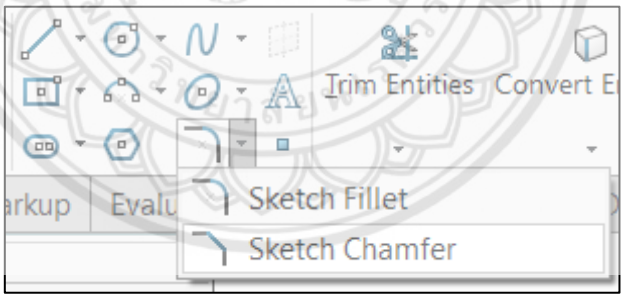
1.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



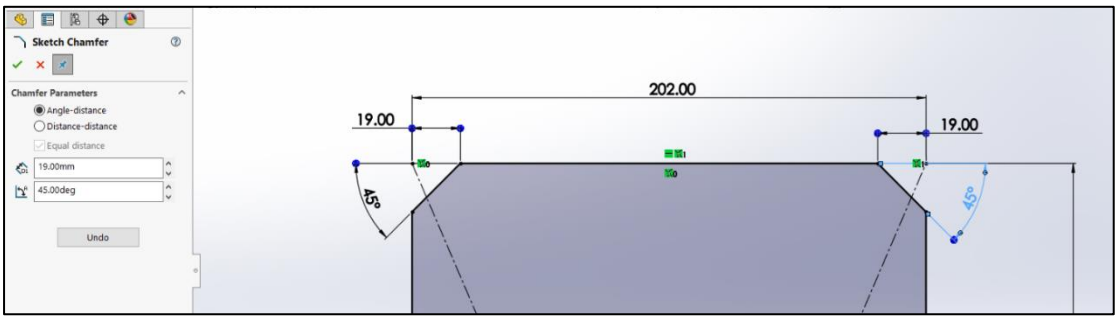
1.4 สร้างสี่เหลี่ยมขนาด 202 x 470 mm



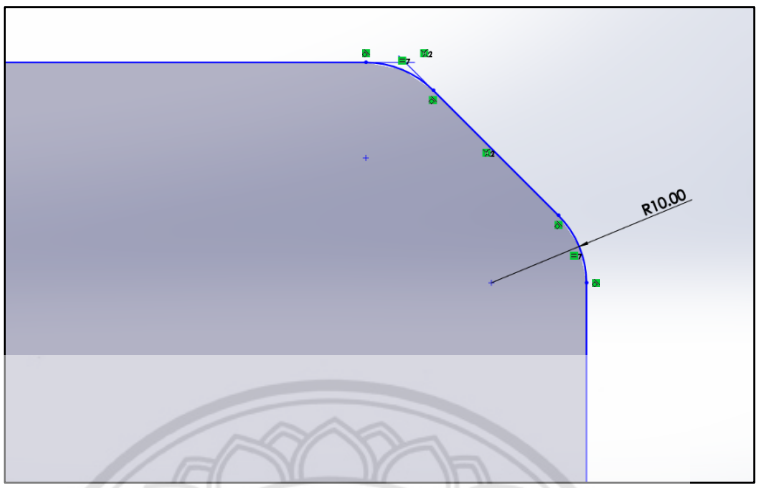
1.5 ตัดมุมของสี่เหลี่ยมด้วยคำสั่ง Chamfer จากเมนู



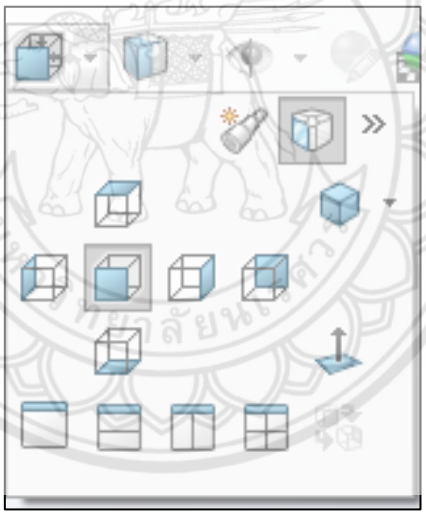
1.6 ตัดมุมของสี่เหลี่ยมขนาด 19 mm ที่ทำมุม 90°



1.7 ลบมุมของจุดที่ทำ Chamfer ด้วยคำสั่ง Fillet จากเมนู

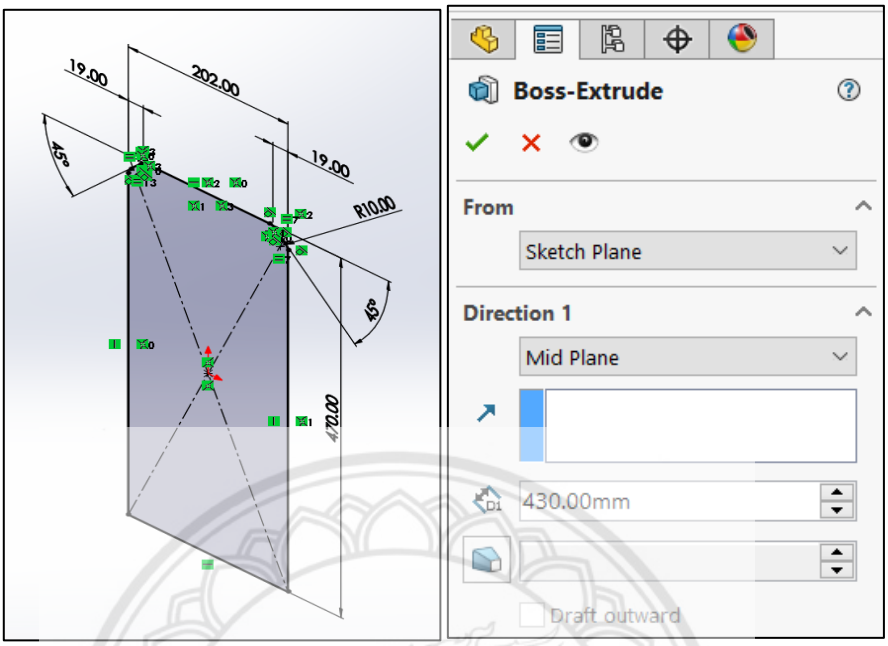


1.8 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

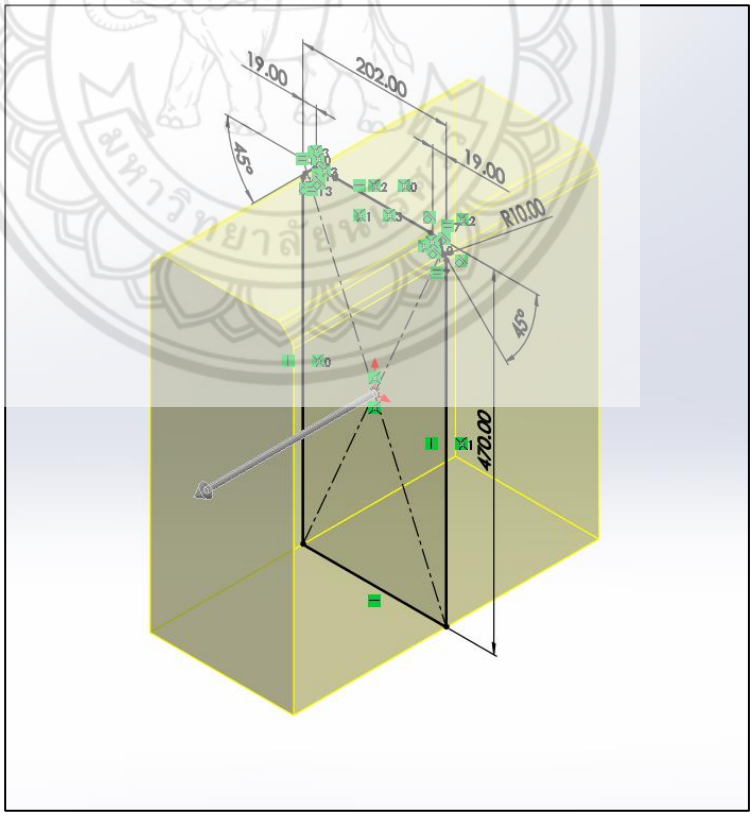


1.9 คลิก Features เลือก Extruded Boss/Base

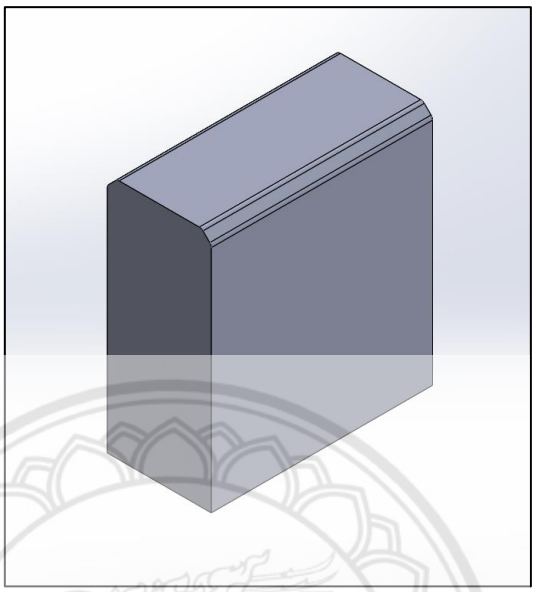
1.9.1 กำหนด Depth (ความยาวของเคส) 430 mm



1.9.2 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane

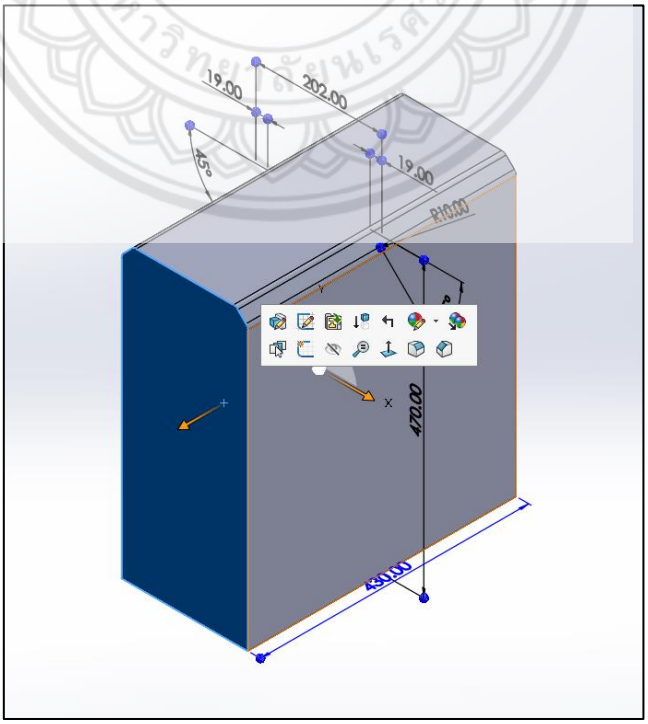


1.9.3 คลิก OK

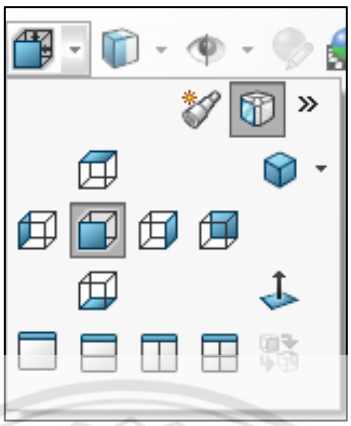


1.10 เลือกระนาบของกล่องที่ทำการ Extruded

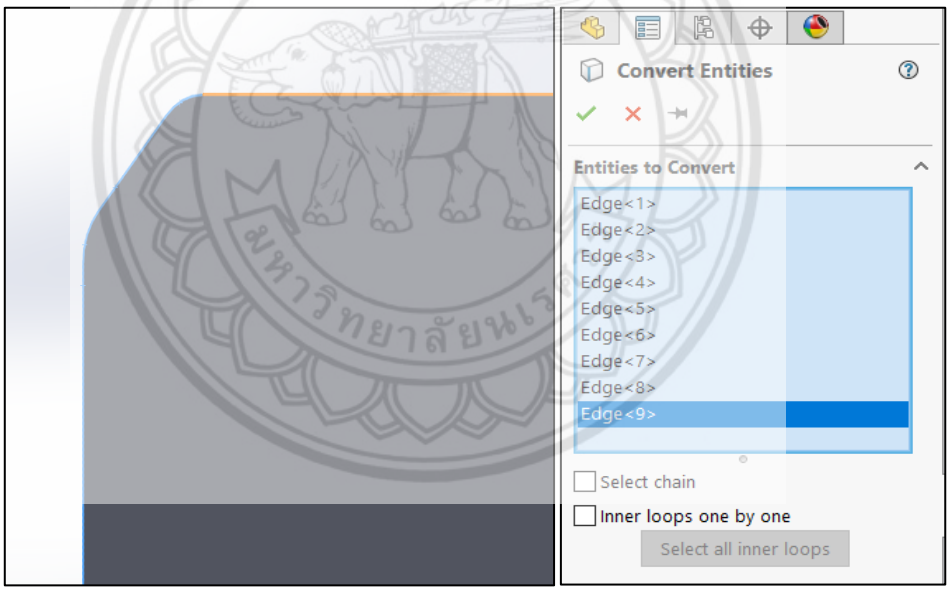
1.10.1 เลือก Insert Sketch จากเมนู



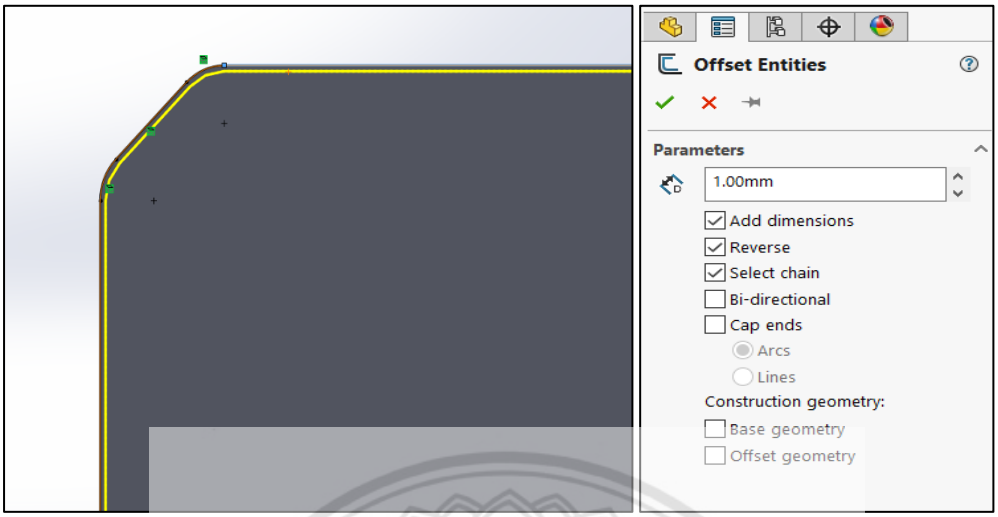
1.10.2 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To



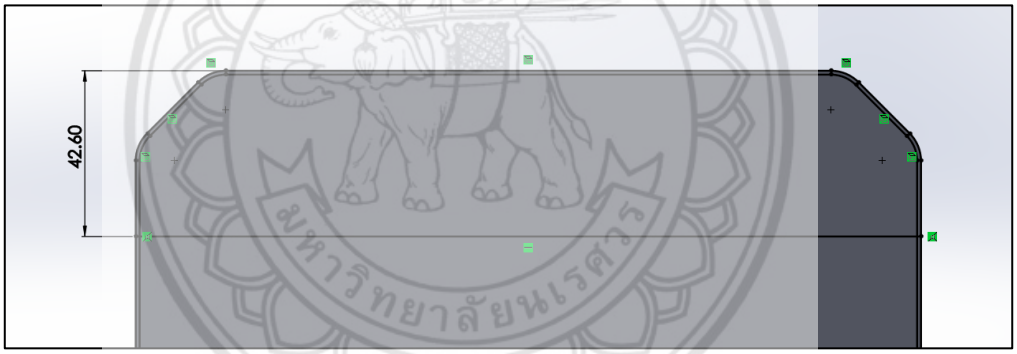
1.10.3 สร้างเส้นใหม่จากคำสั่ง Convert Entities เลือก**เส้นที่ต้องการ จากนั้น** กด OK



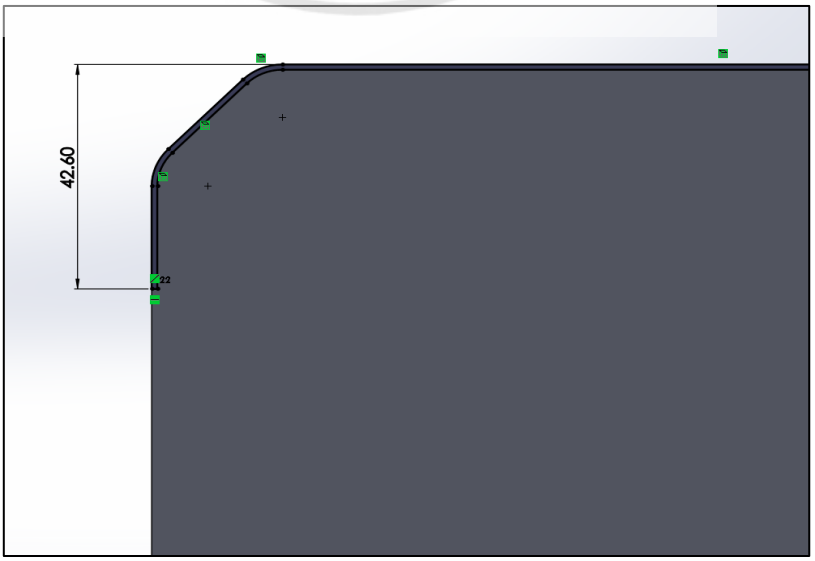
1.10.4 คัดลอกเส้นจากคำสั่ง Offset Entities และกำหนด Depth เป็น 1 mm จากนั้นคลิก OK



1.10.5 สร้างเส้นจากคำสั่ง Line และกำหนดระยะจากด้านบน 42.60 mm โดยคำสั่ง Smart Dimension

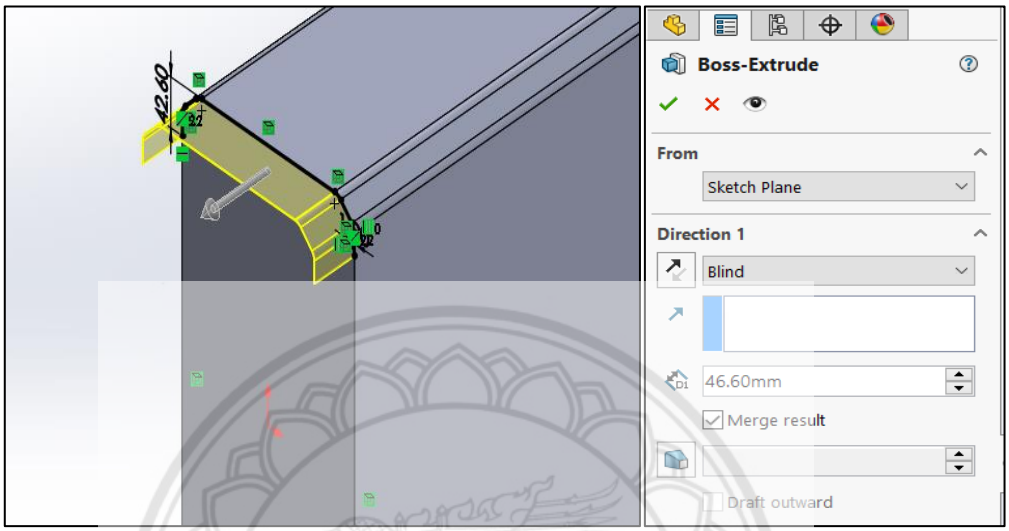


1.10.6 ลบเส้นที่ไม่ต้องการใช้ออก โดยคำสั่ง

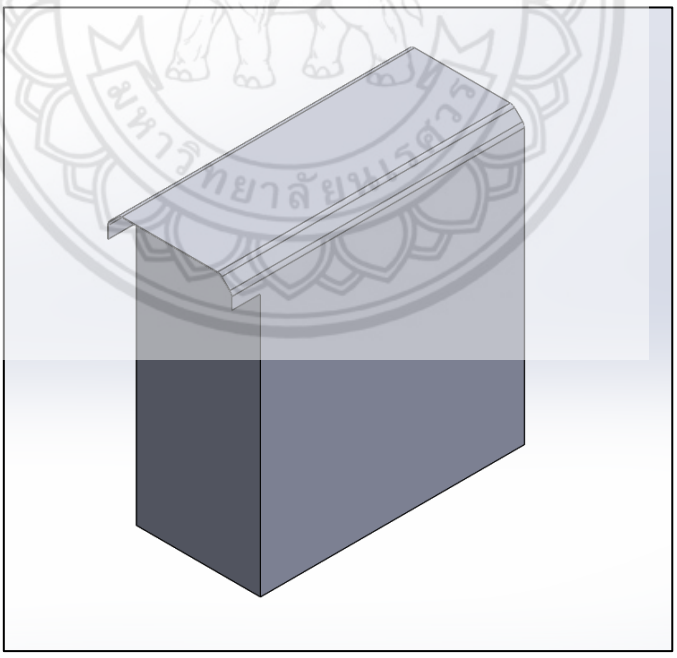


1.10.7 คลิก Features เลือก Extruded Boss/Base

1.10.8 กำหนด Depth (ความยาวของเคส) 46.60 mm

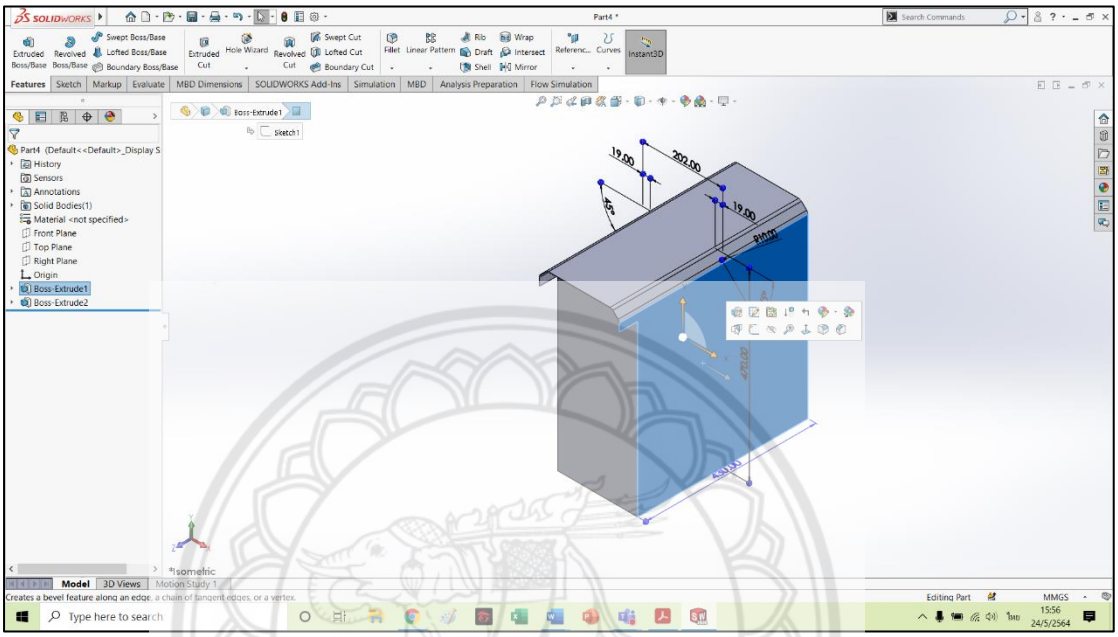


1.10.9 คลิก OK

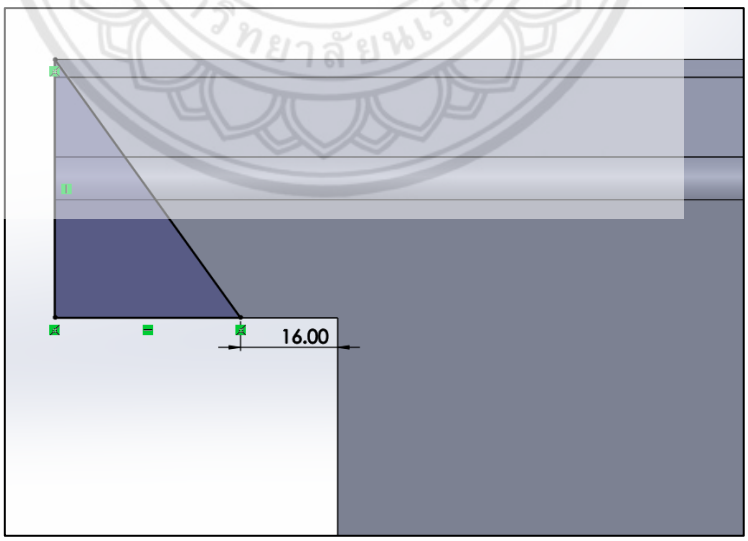


1.11 ตัดส่วนที่ไม่ได้ใช้

1.11.1 เลือกระนาบด้านข้างของเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

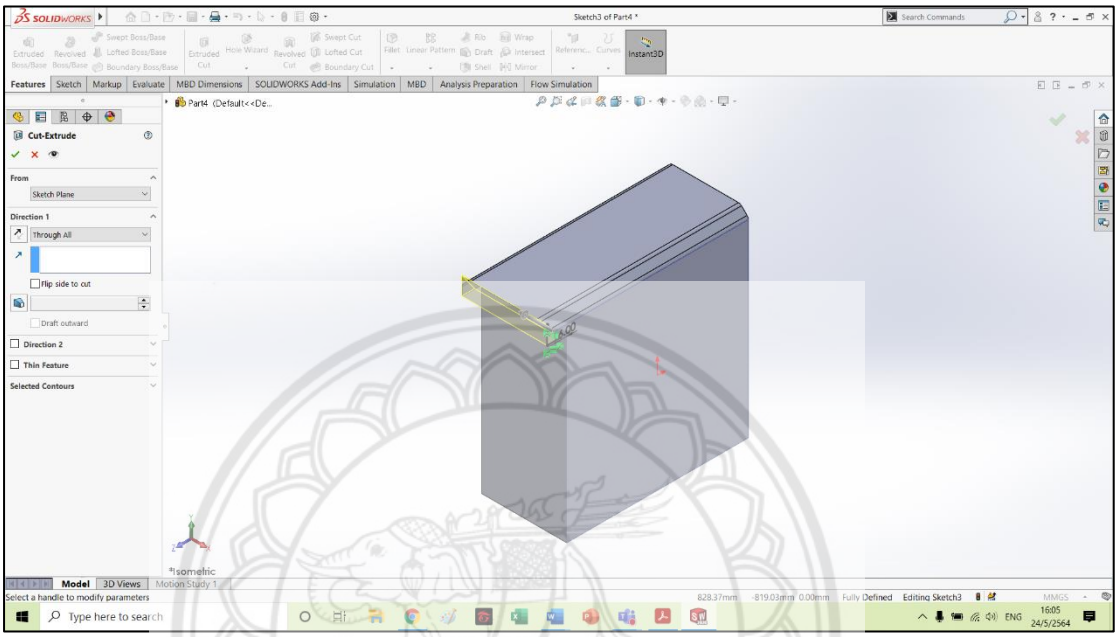


1.11.2 สร้างเส้นจากคำสั่ง Line และกำหนด Depth (ระยะจากด้านหน้า) 16 mm

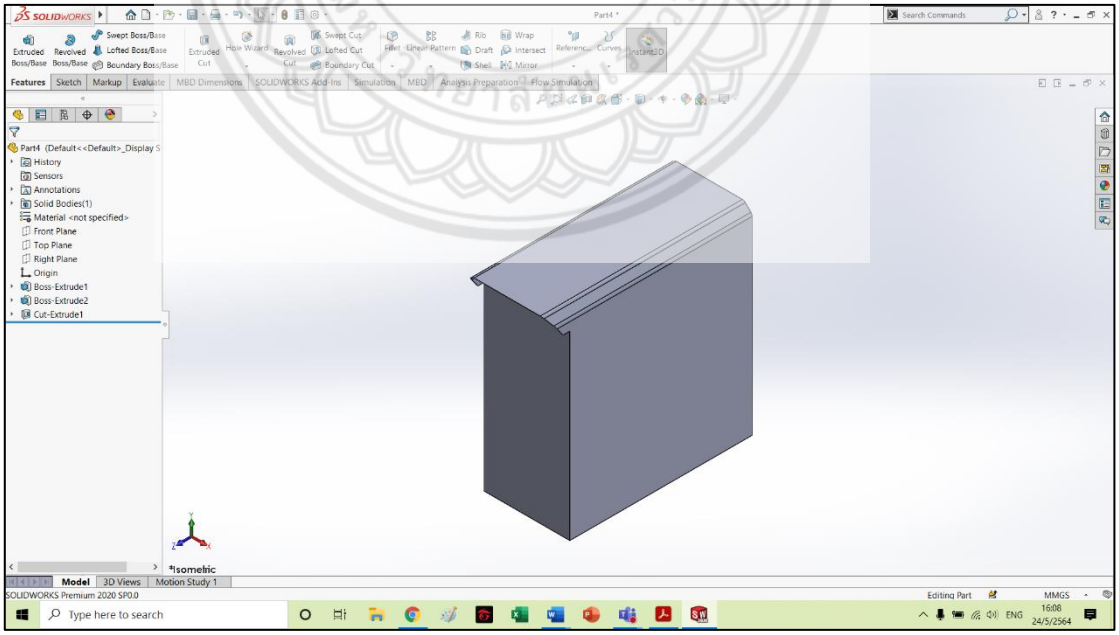


1.11.3 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut จากเมนู

1.11.4 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Through All



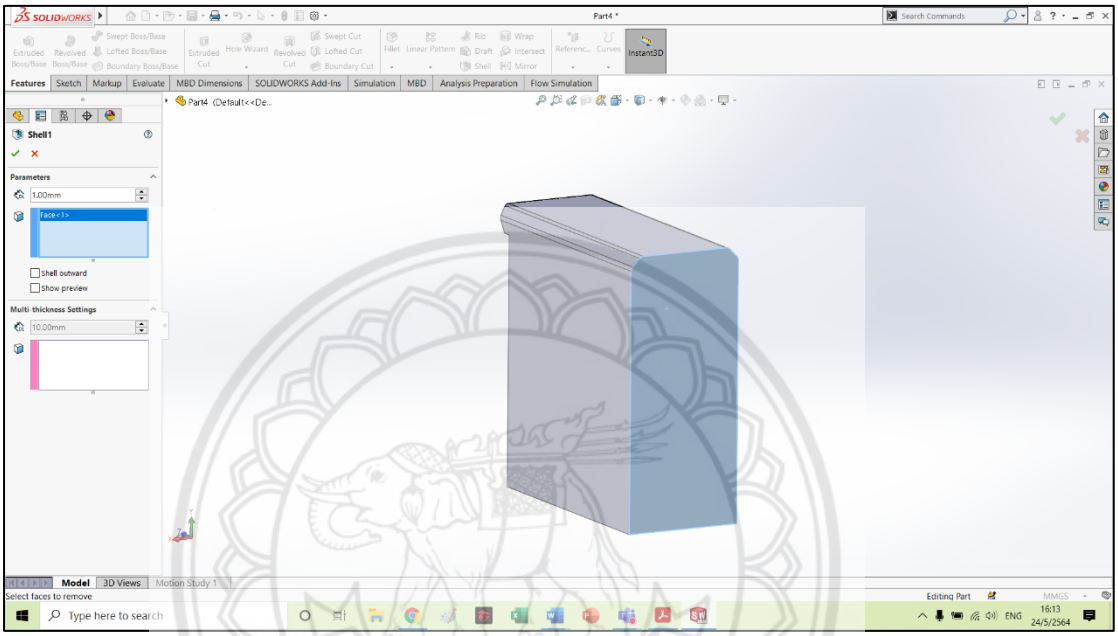
1.11.5 คลิก OK



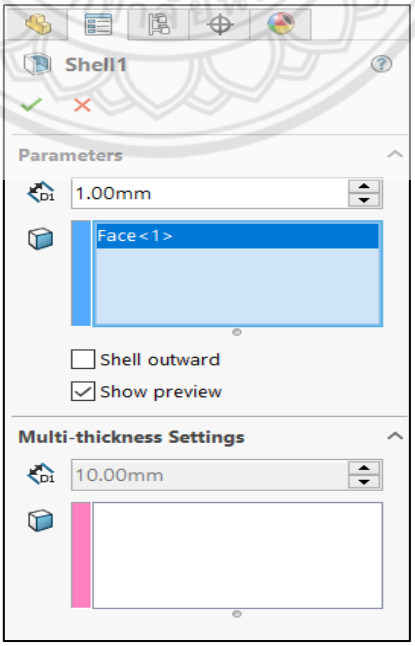
2. สร้างขอบ Shell

2.1 เลือกคำสั่ง Shell จากเมนู

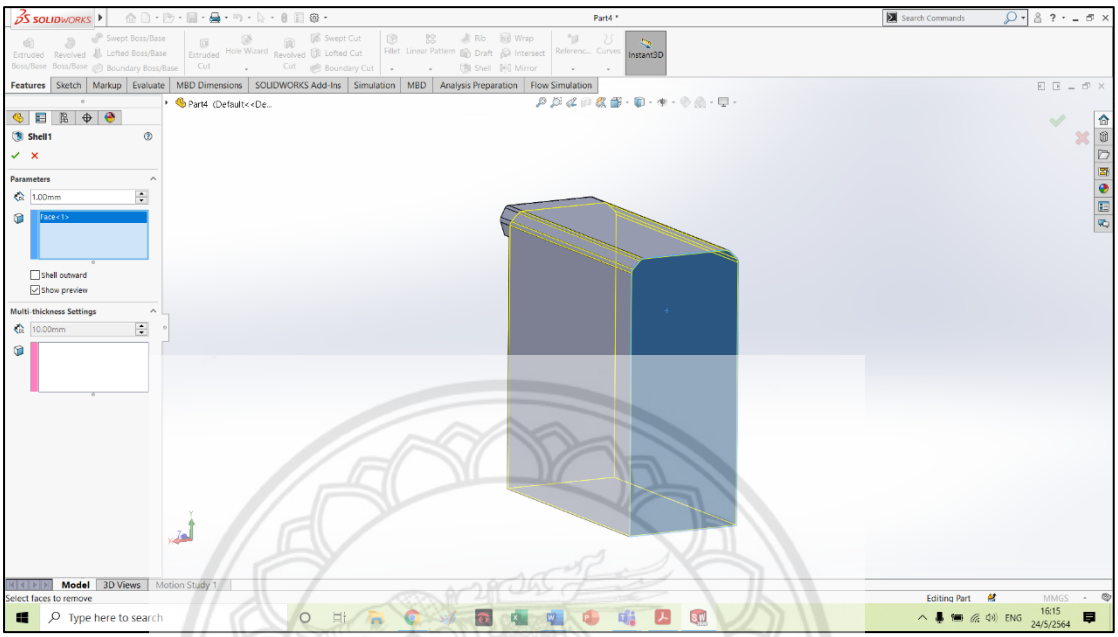
2.2 เลือกพื้นที่ที่ต้องการ Shell



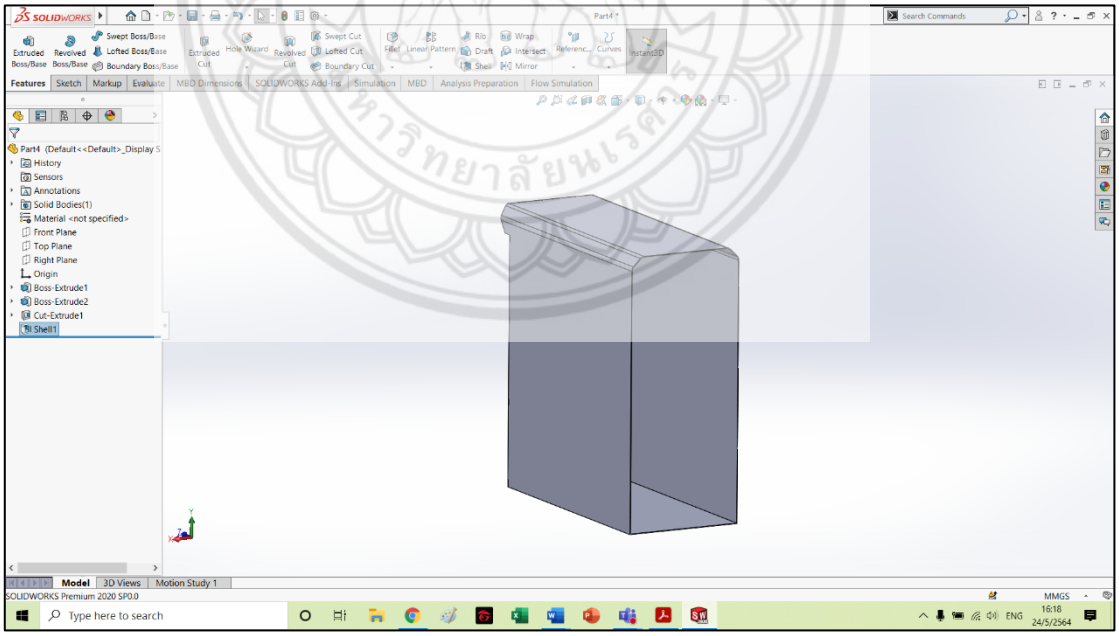
2.3 กำหนด Depth (ความหนาของขอบ Shell) 1 mm



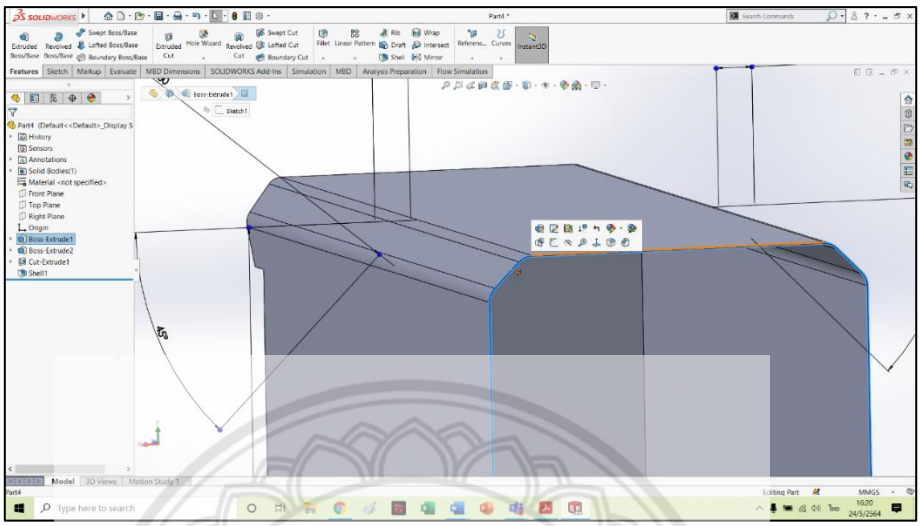
2.4 คลิกเลือก Show preview



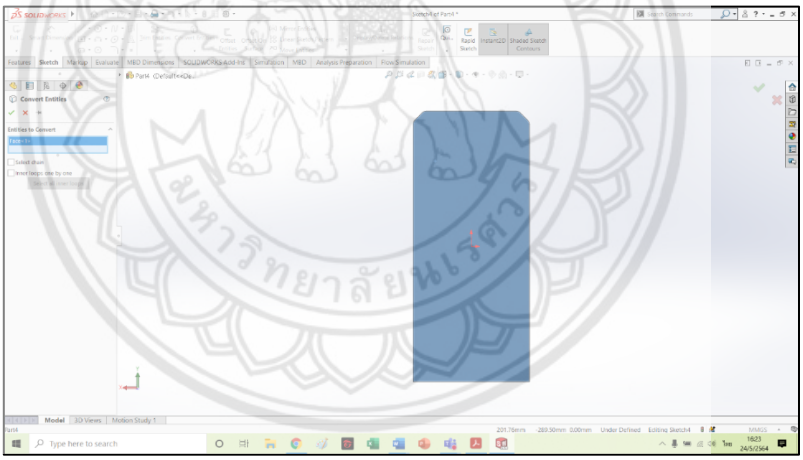
2.5 คลิก OK



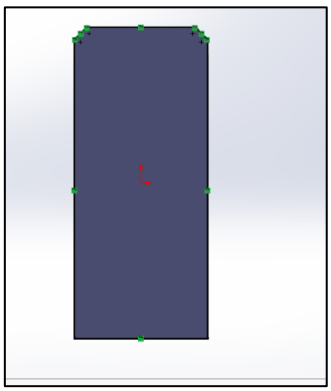
2.6 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



2.7 เลือกคำสั่ง Convert Entities จากนั้นเลือก Face เพื่อคัดลอกเส้น



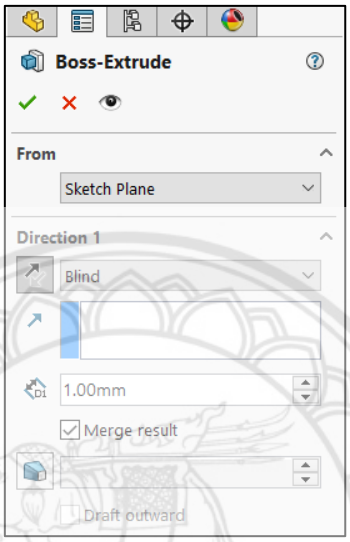
2.8 คลิก OK



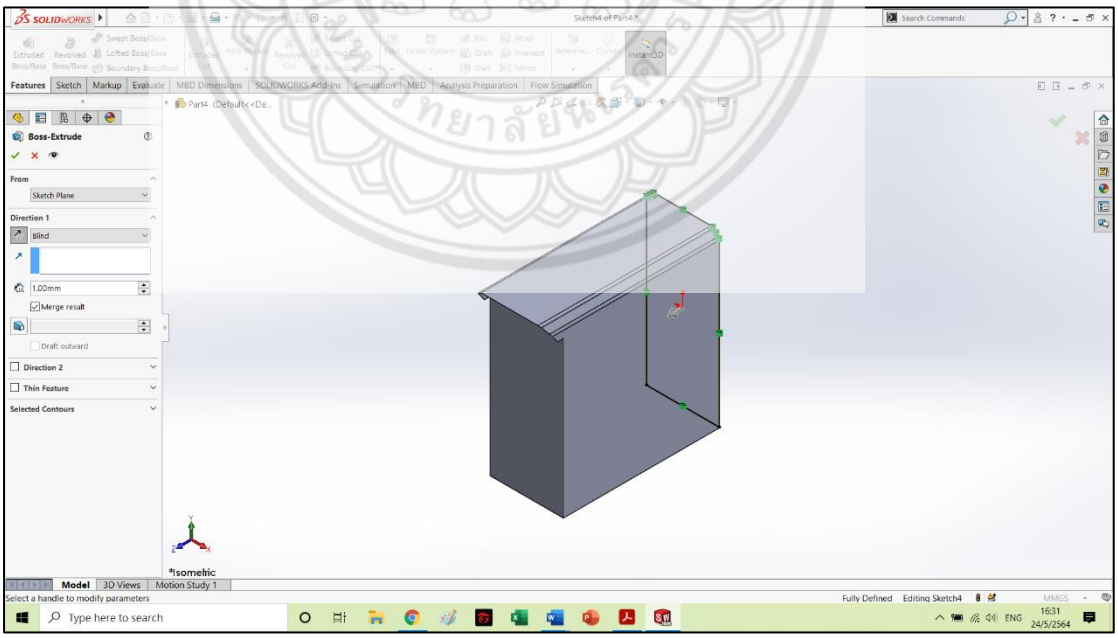
2.9 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.10 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

2.10.1 กำหนด Depth (ความหนาของเคส) 1 mm



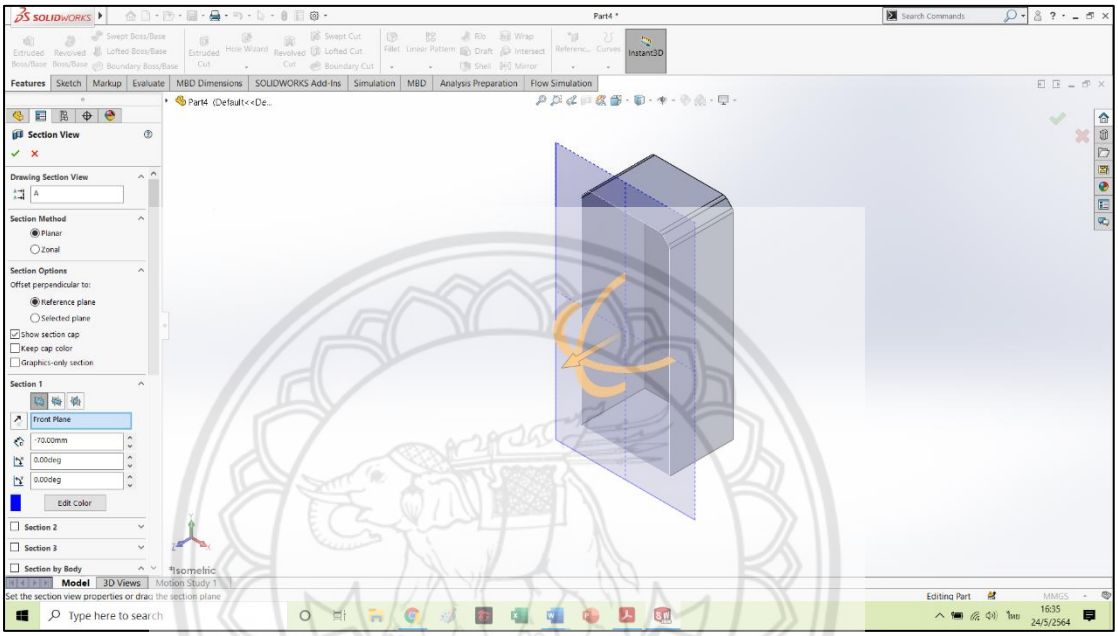
2.10.2 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



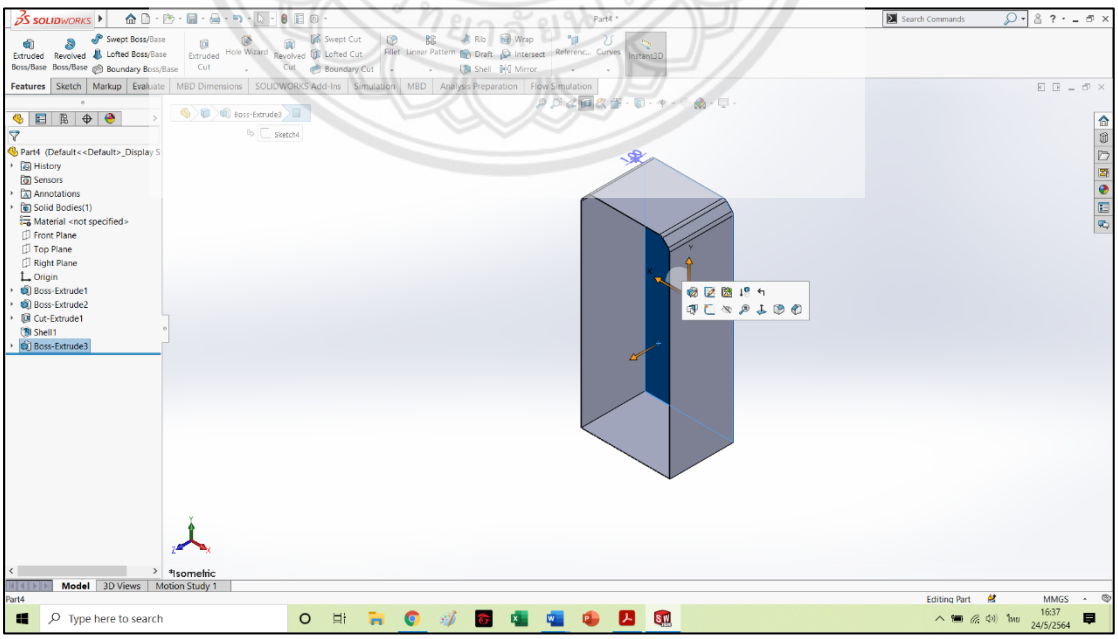
2.10.3 คลิก OK

3. การสร้างกล่อง Power supply

3.1 เลือกคำสั่ง Section View จากเมนู เพื่อสร้าง Sketch ภายในเคส



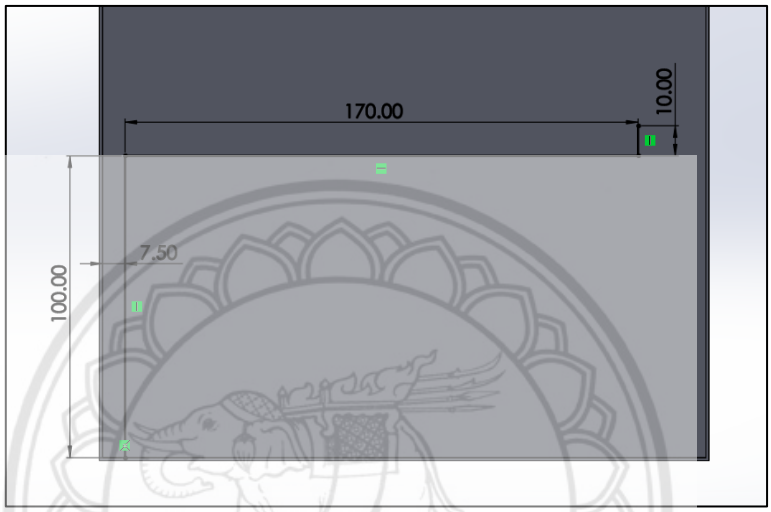
3.2 คลิกเลือกพื้นที่ภายในเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



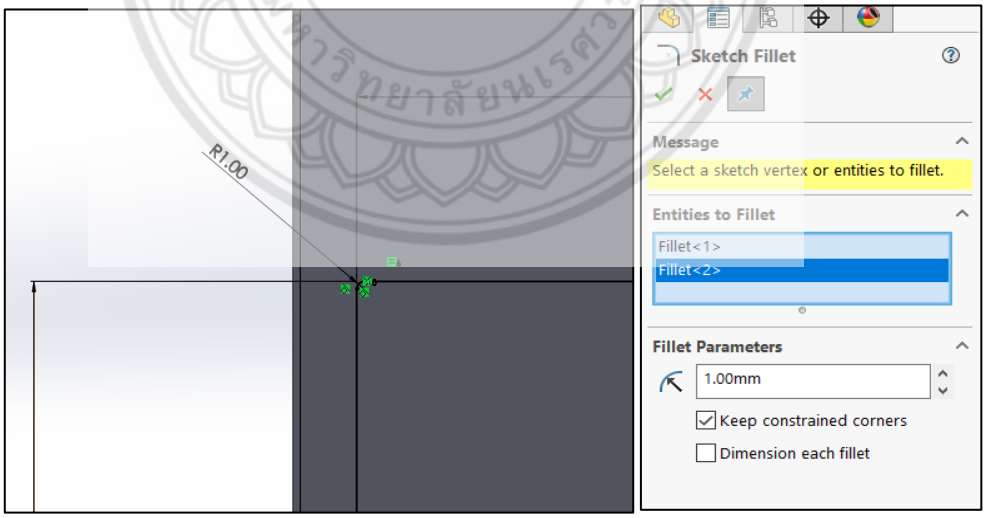
3.3 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

3.4 เลือกคำสั่ง Line เพื่อสร้างเส้น

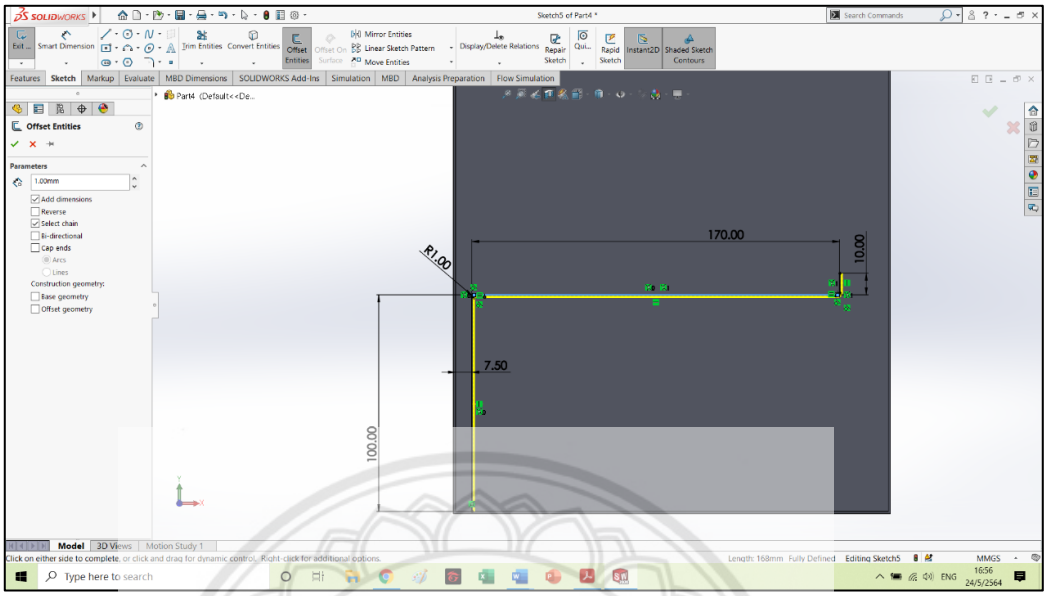
3.5 เลือกคำสั่ง Smart Dimension กำหนดระยะของเส้นห่างจากด้านข้าง 7.50 mm ความสูงจากพื้น 100 mm ความยาว 170 mm ความสูงของเส้นเล็ก 10 mm



3.6 ลบมุมด้วยคำสั่ง Sketch Fillet รัศมี 1 mm



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

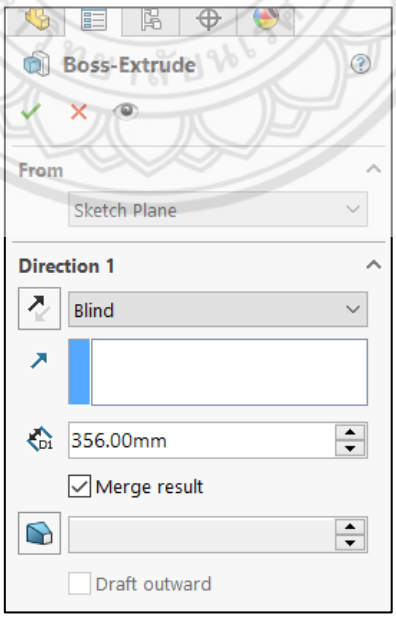


3.8 คลิก OK

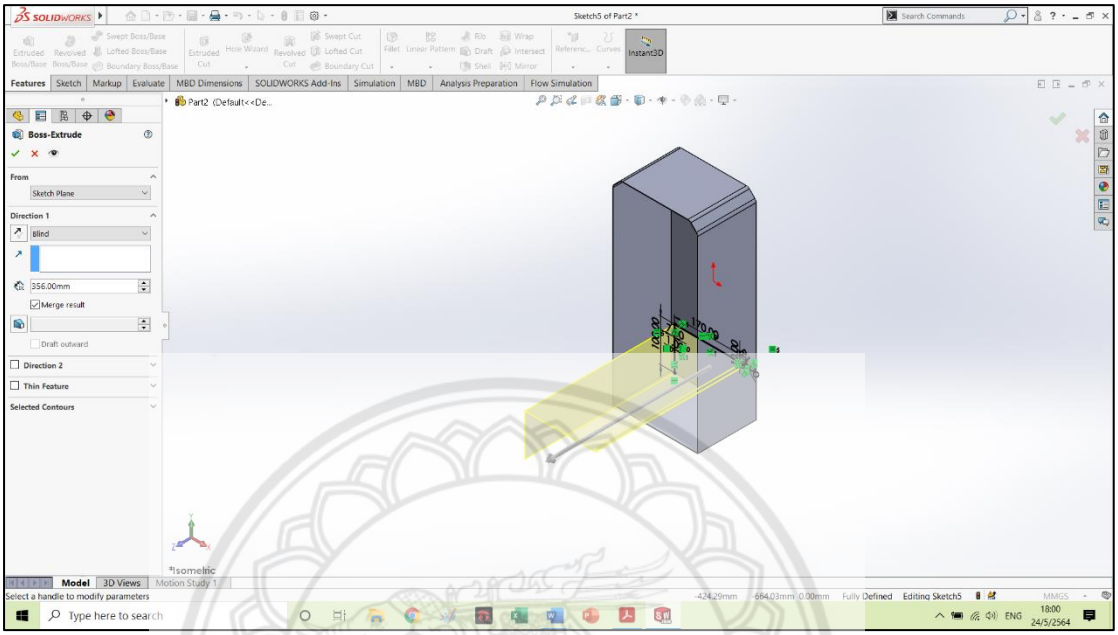
3.9 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

3.9.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.9.2 กำหนด Depth (ความยามของกล่อง Supply) 356 mm

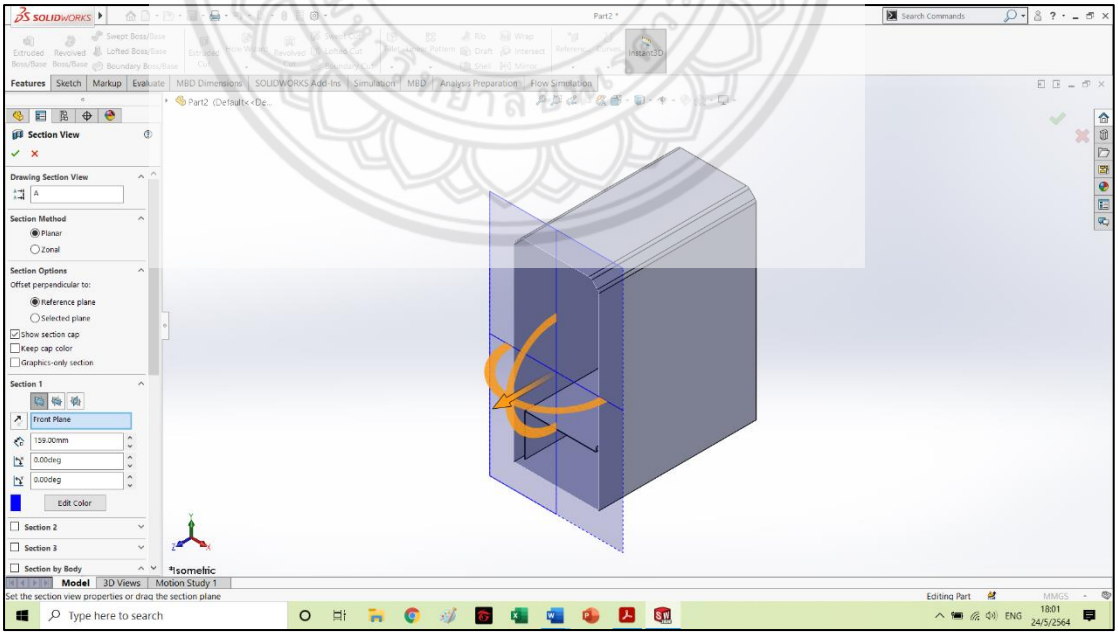


3.9.3 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



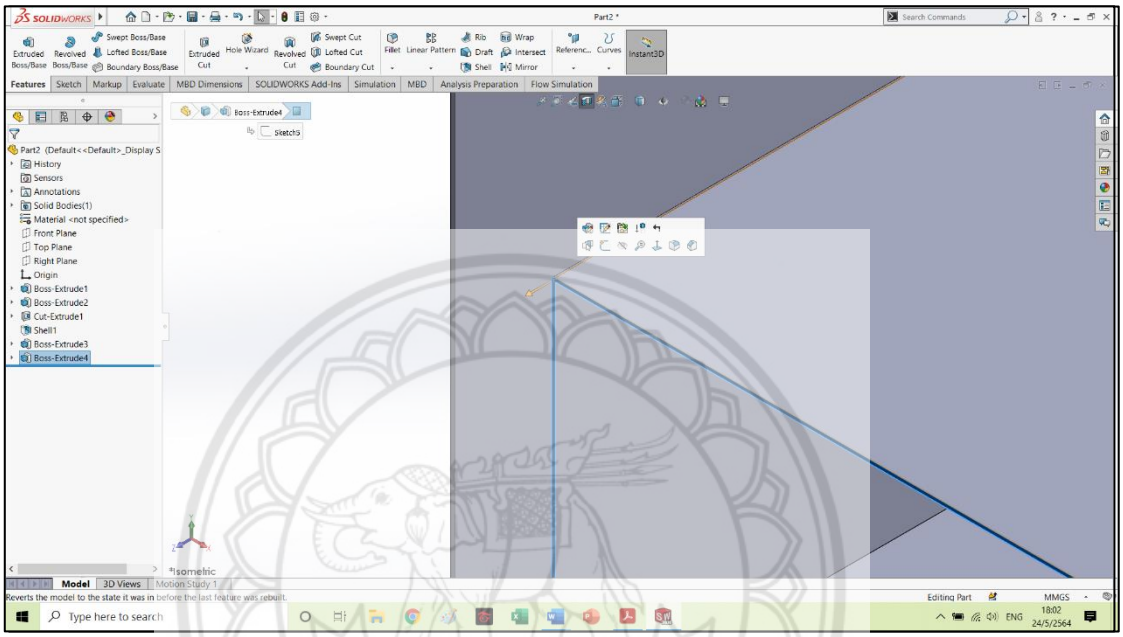
3.9.4 คลิก OK

3.9.5 ปรับความเหมาะสมของมุมมอง Section View



3.9.6 คลิก OK

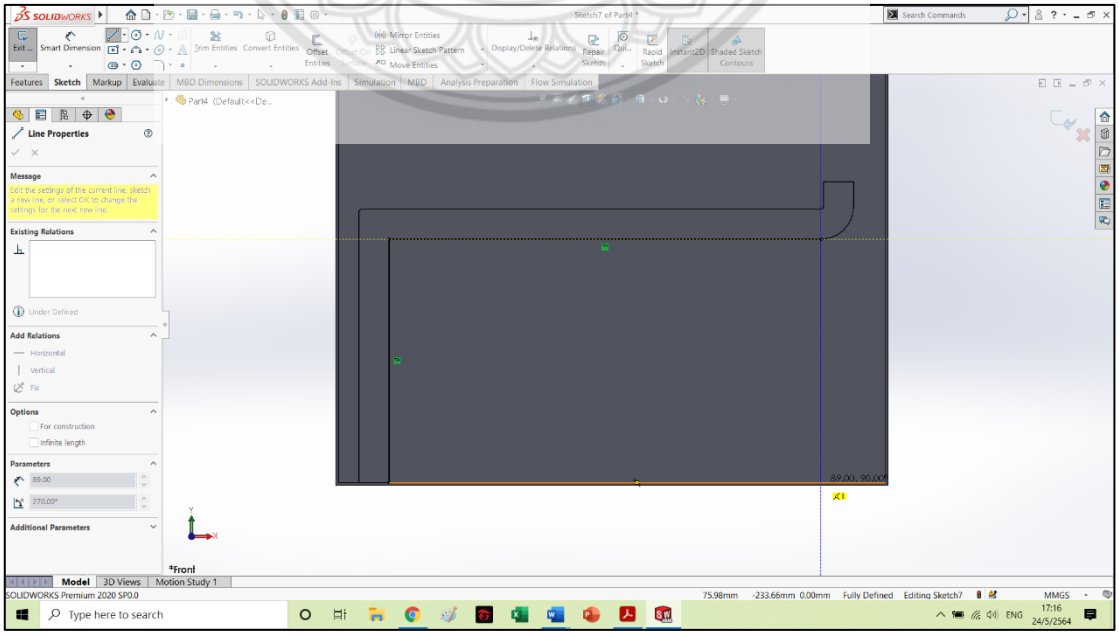
3.9.7 เลือกพื้นที่ด้านหน้ากล่อง Supply แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch
จากเมนู



3.9.8 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

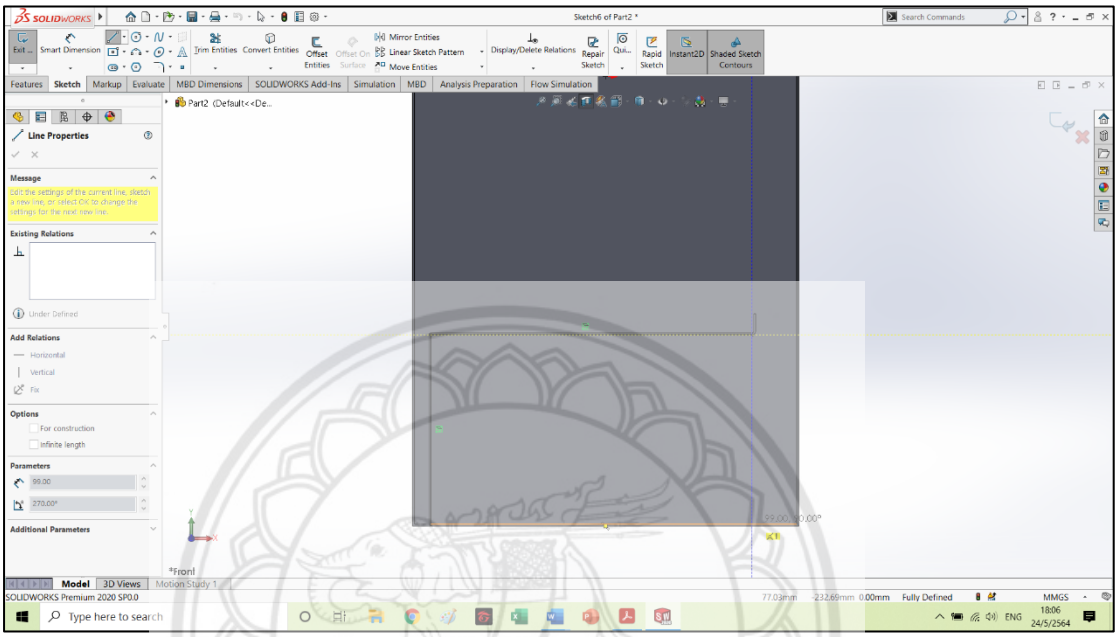
3.9.9 เลือกคำสั่ง Convert Entities

จากเมนู



3.9.10 คลิก OK

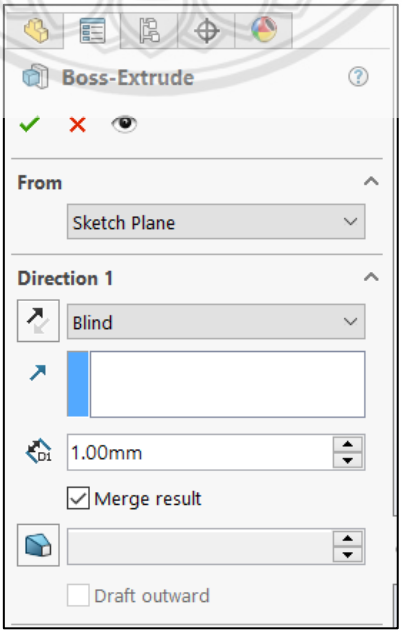
3.9.11 เลือกคำสั่ง Line จากเมนู



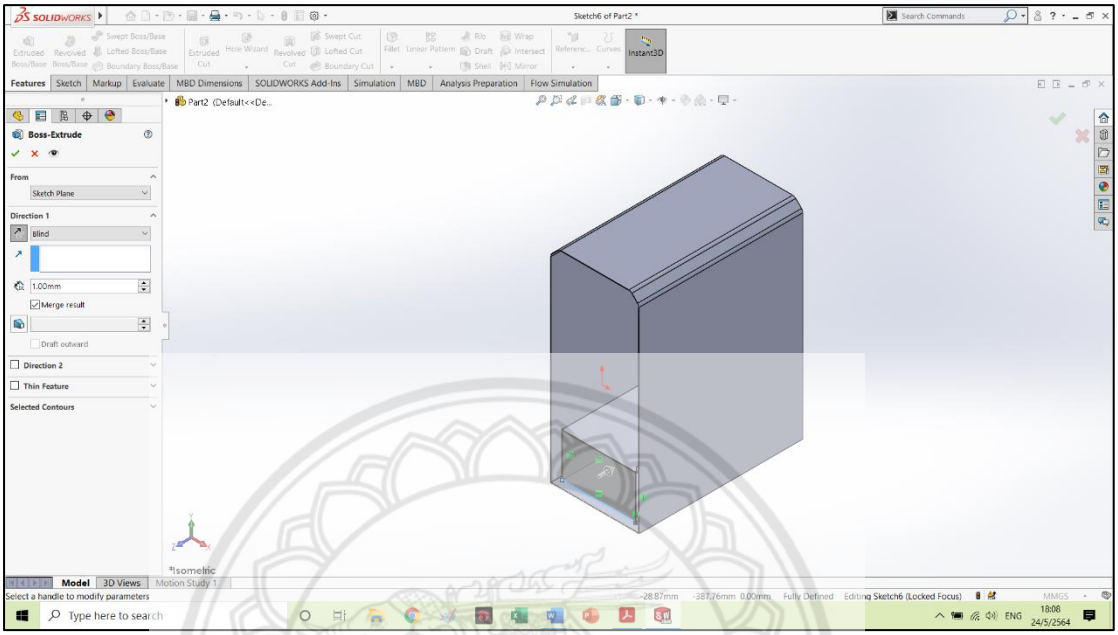
3.9.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.9.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

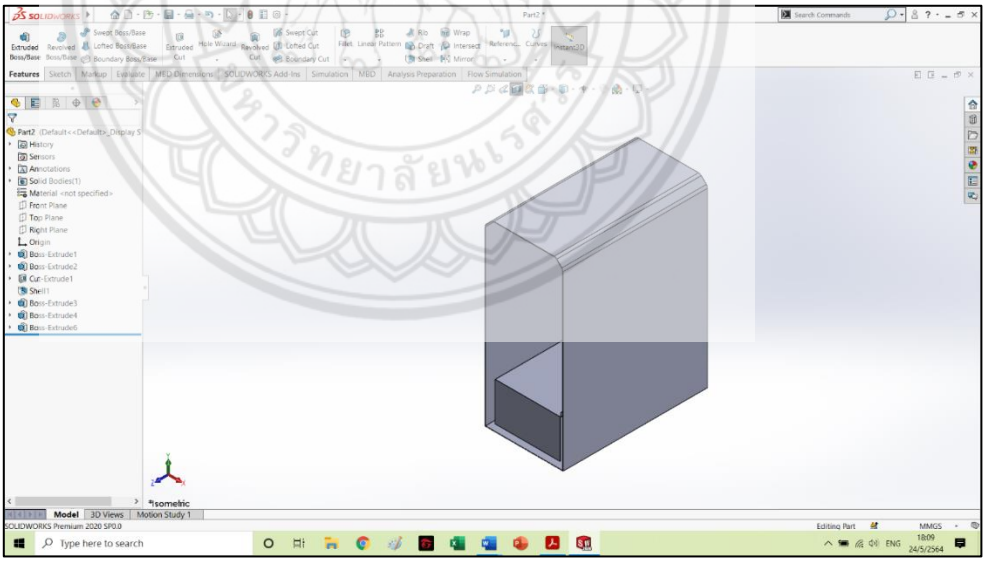
3.9.14 กำหนด Depth (ความหนาของกล่อง Supply) 1 mm



3.9.15 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind



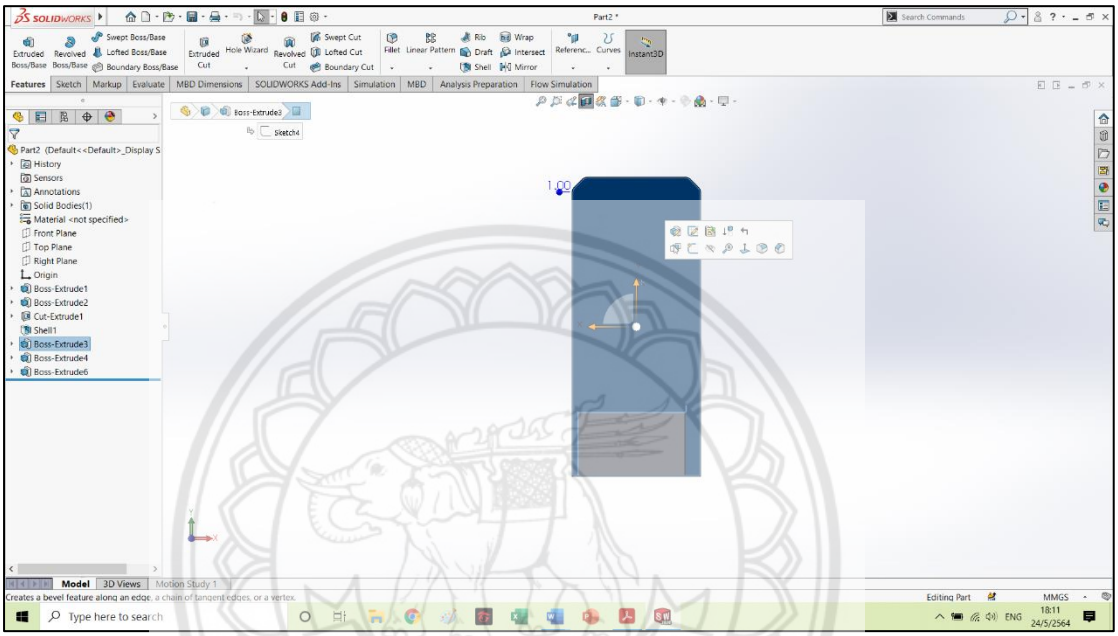
3.9.16 คลิก OK



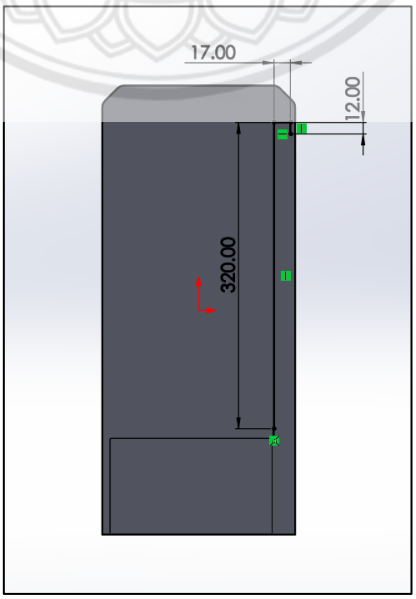
4. การสร้างแผ่นยึดเมนบอร์ด

4.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

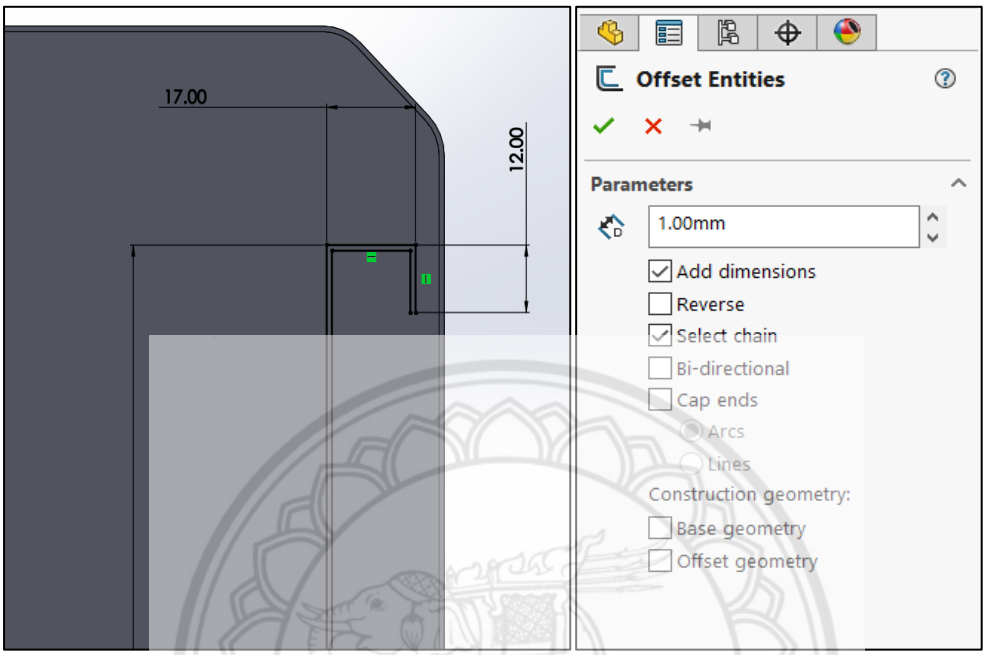
4.2 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch



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

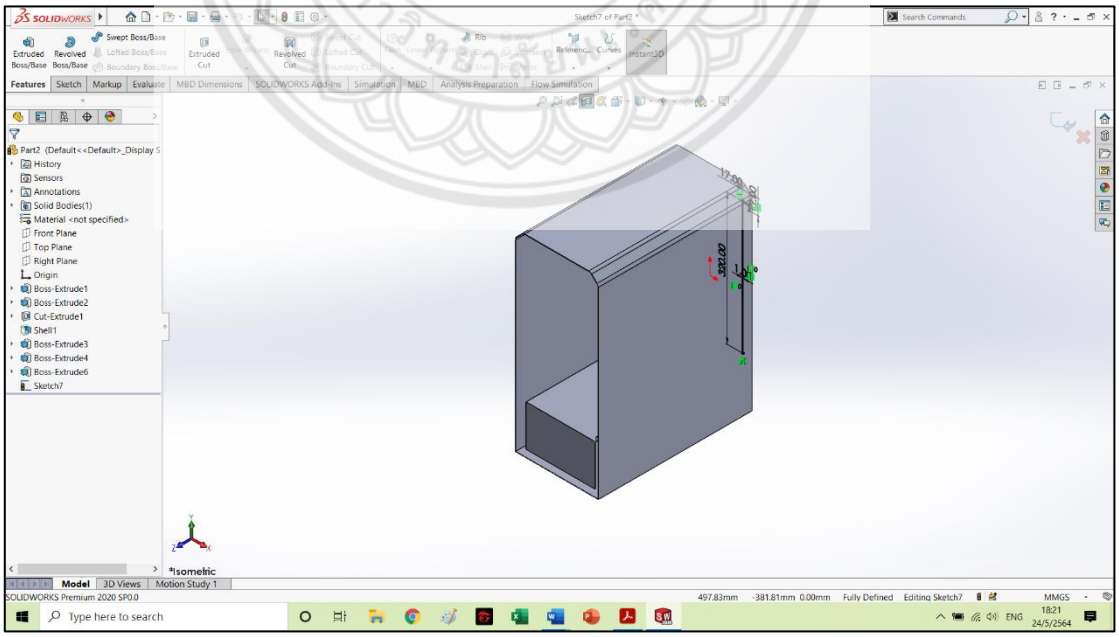


4.4 เลือกคำสั่ง Offset Entities และกำหนดความหนาของแผ่น 1 mm



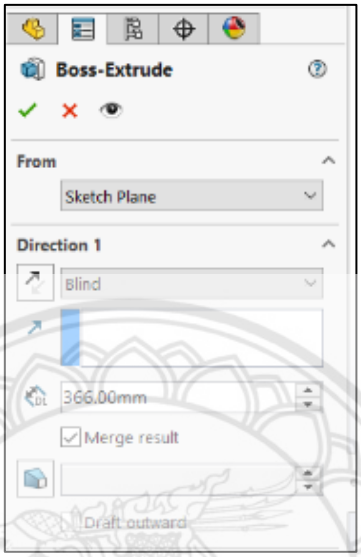
4.5 คลิก OK

4.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

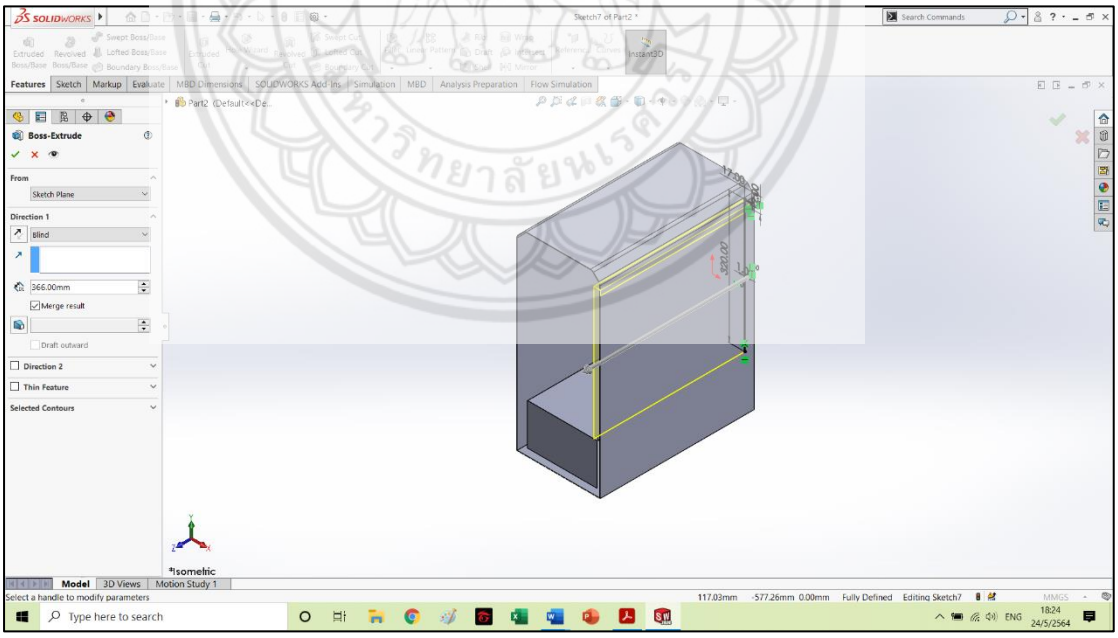


4.6.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

4.6.2 กำหนด Depth (ความกว้างของแผ่นยึดเมนบอร์ด) 366 mm



4.6.3 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind

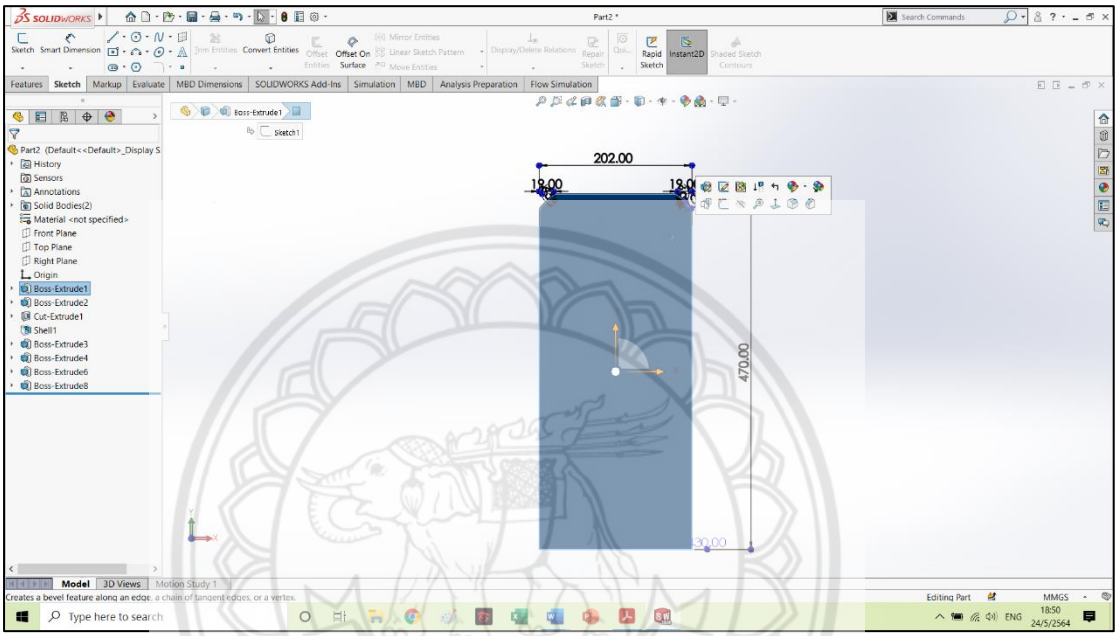


4.6.4 คลิก OK

5. การสร้างแผงหน้าเคสคอมพิวเตอร์

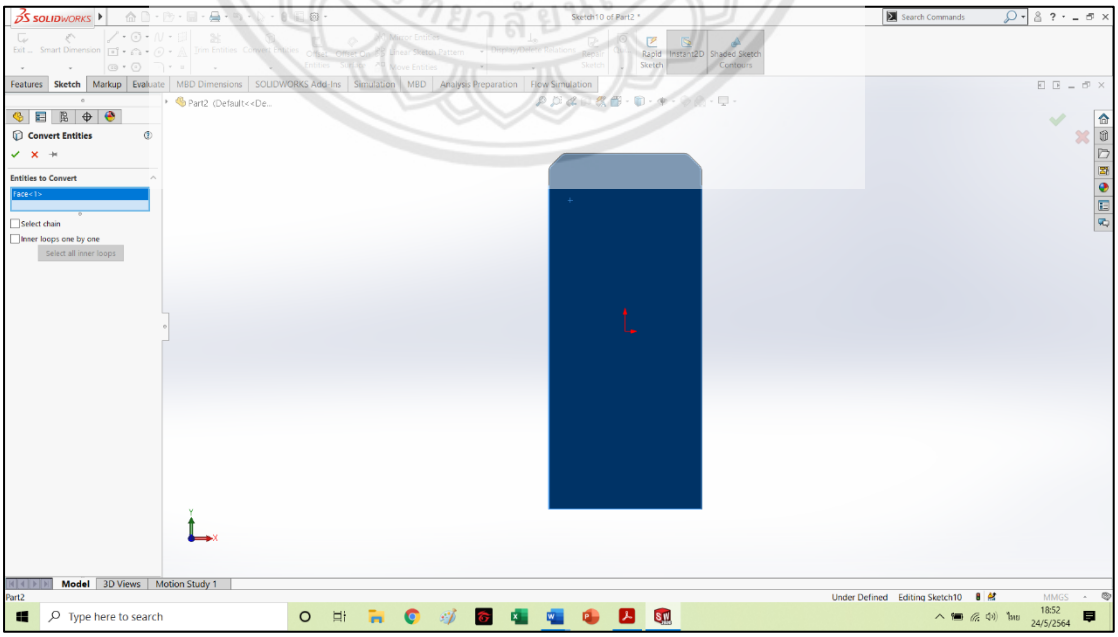
5.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

5.2 เลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch



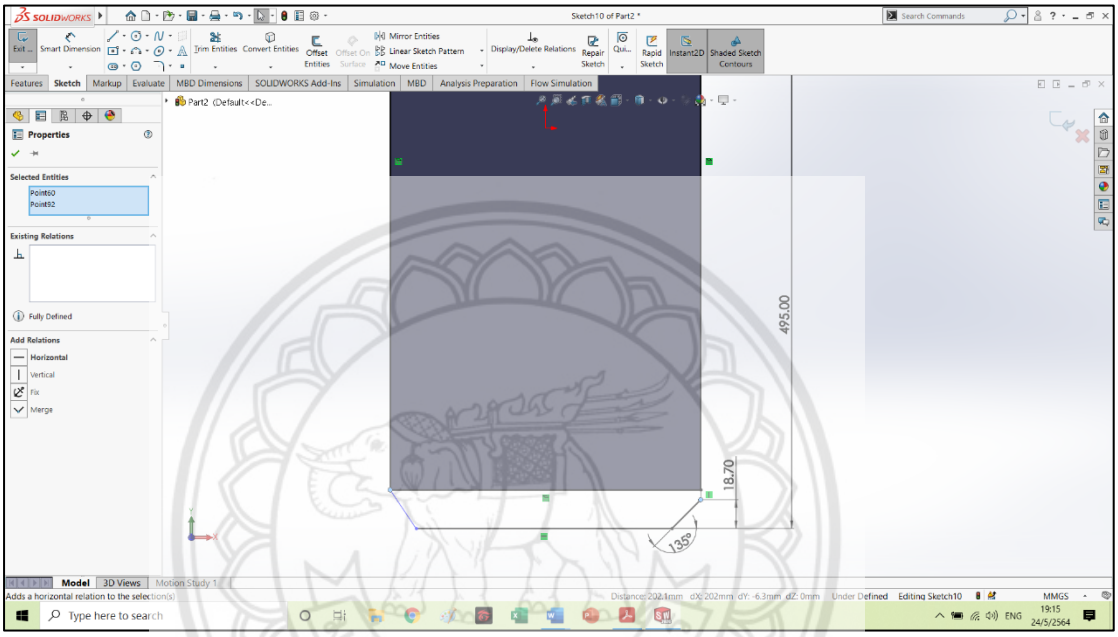
5.3 เลือกคำสั่ง Convert Entities

จากเมนู และเลือกพื้นที่ทั้งหมด



5.4 คลิก OK

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

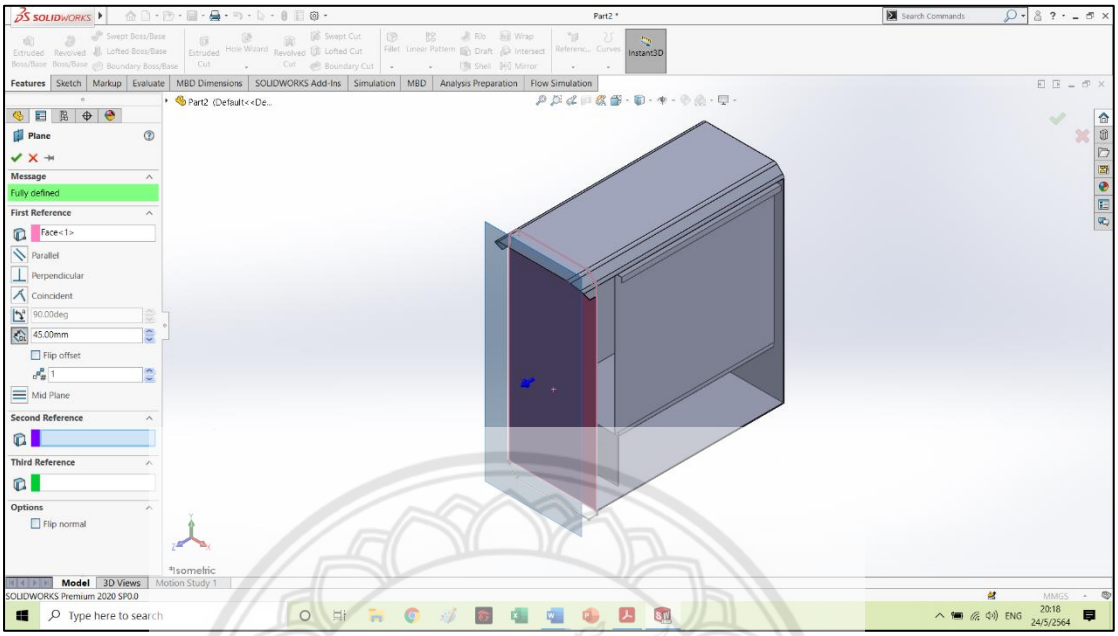


5.6 คลิกเลือกคำสั่ง Exit Sketch

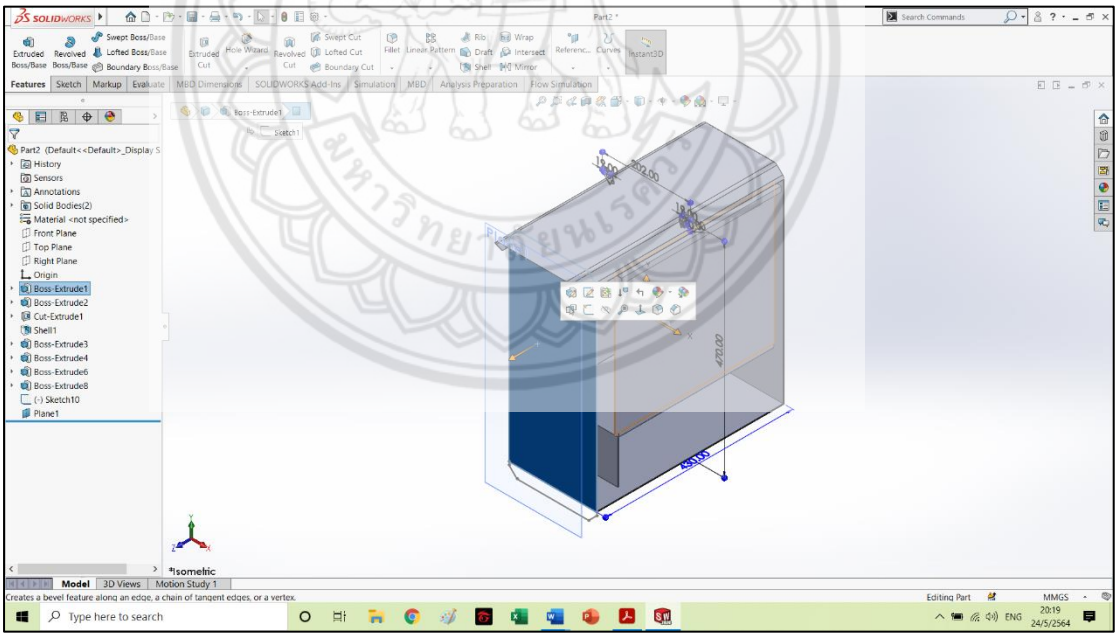
5.7 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

5.8 คลิก Features และคลิกคำสั่ง Reference Geometry แล้วเลือกคำสั่ง Plane

5.9 คลิกเลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส และกำหนด Depth (ความห่างของ Plane กับด้านหน้าเคส) 45 mm

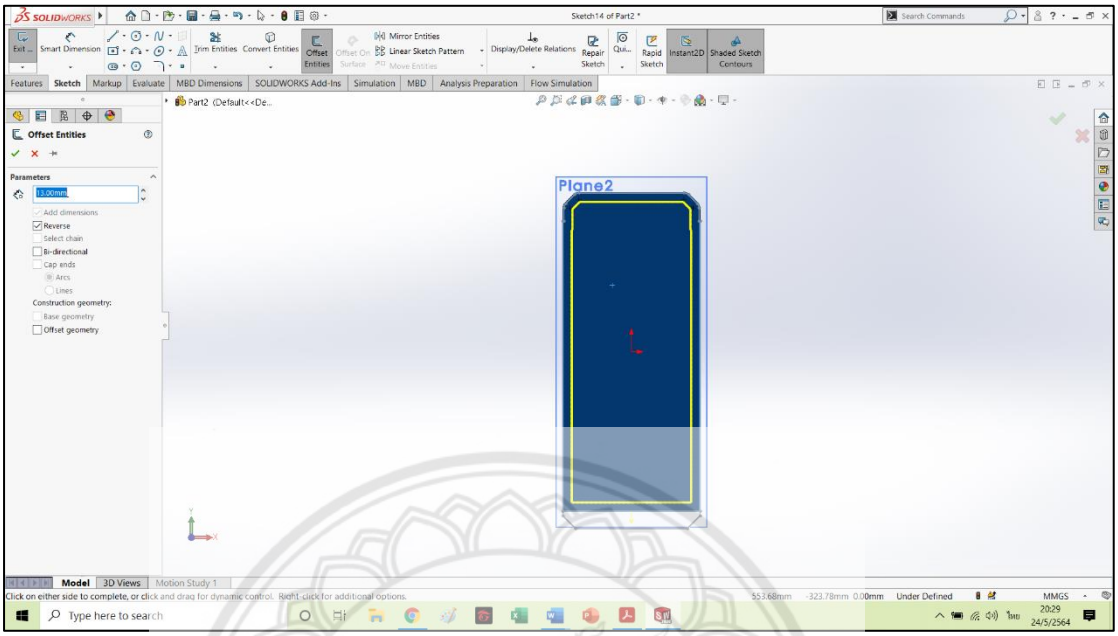


5.10 คลิกที่ Plane ที่พึ่งสร้าง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



5.11 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

5.12 เลือกคำสั่ง Offset Entities แล้วคลิกเลือก Sketch ที่ผ่านมา และกำหนด Depth (ความหนาของการ Offset) 13 mm



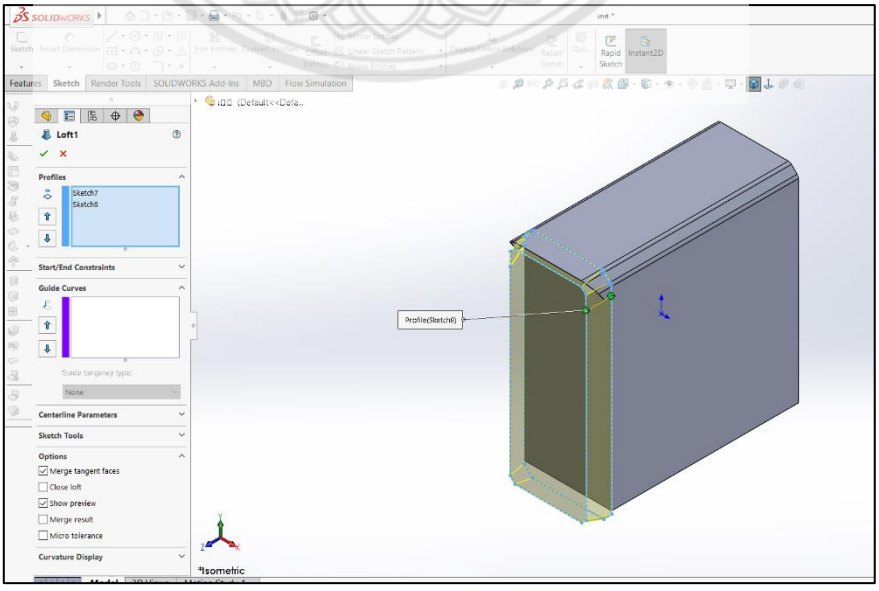
5.13 คลิก OK

5.14 คลิกเลือกคำสั่ง Exit Sketch

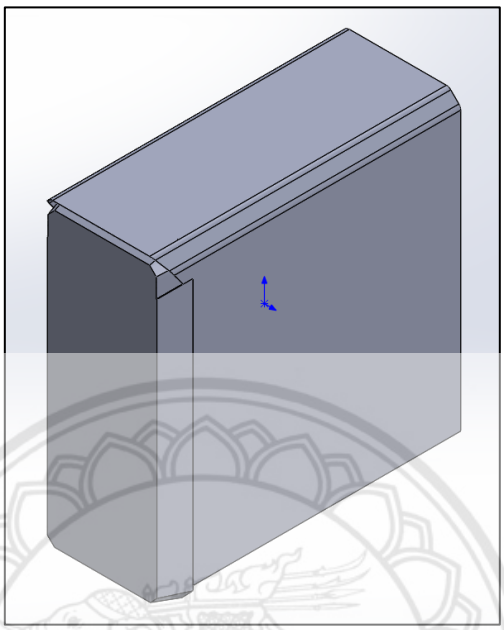
5.15 คลิก Features เลือกคำสั่ง Lofted Boss/Base

5.15.1 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

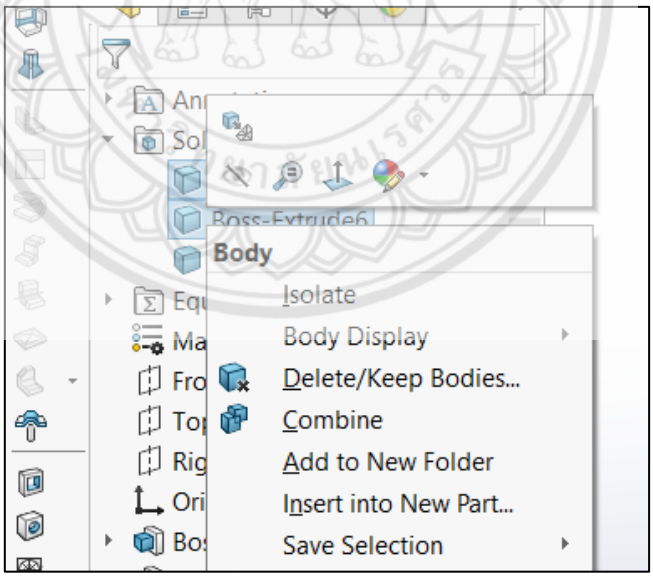
5.15.2 เลือก Sketch ที่สร้างใหม่ ทั้ง 2 Sketch



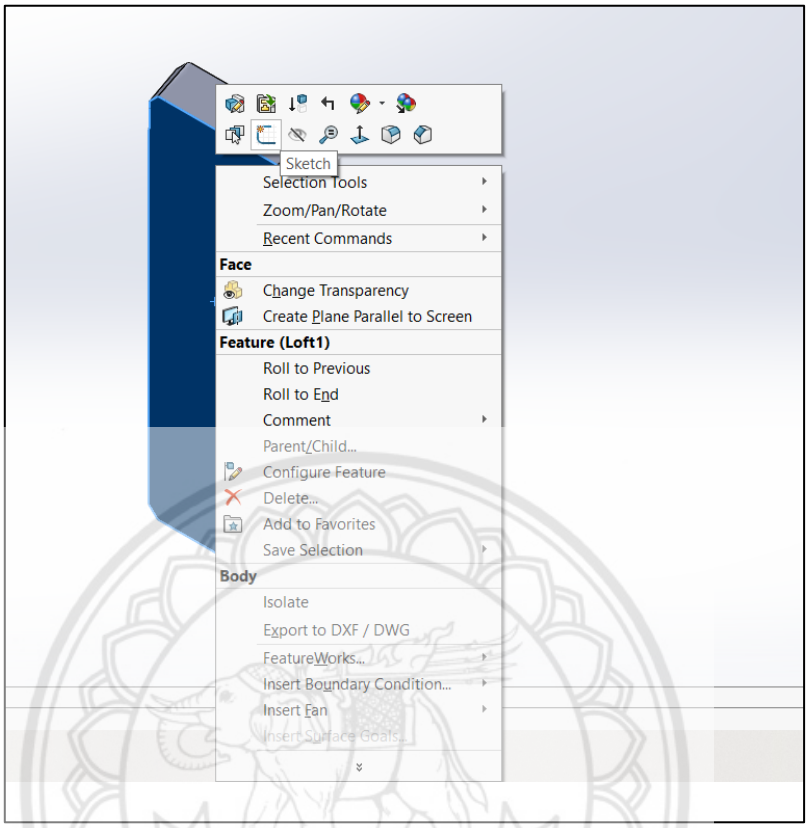
5.15.3 คลิก OK



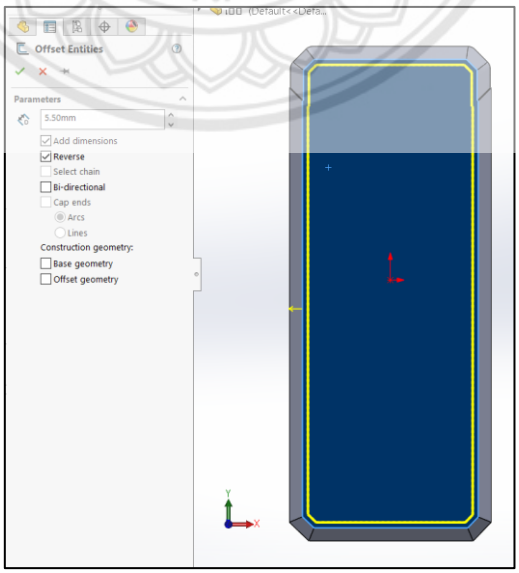
5.16 คลิกเลือกทุก Part ยกเว้น Loft 1 จากนั้นคลิกเลือกที่ Hide เพื่อซ่อน Part ที่เลือก



5.17 เลือกพื้นที่ด้านหน้าของแผง คลิกขวาแล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

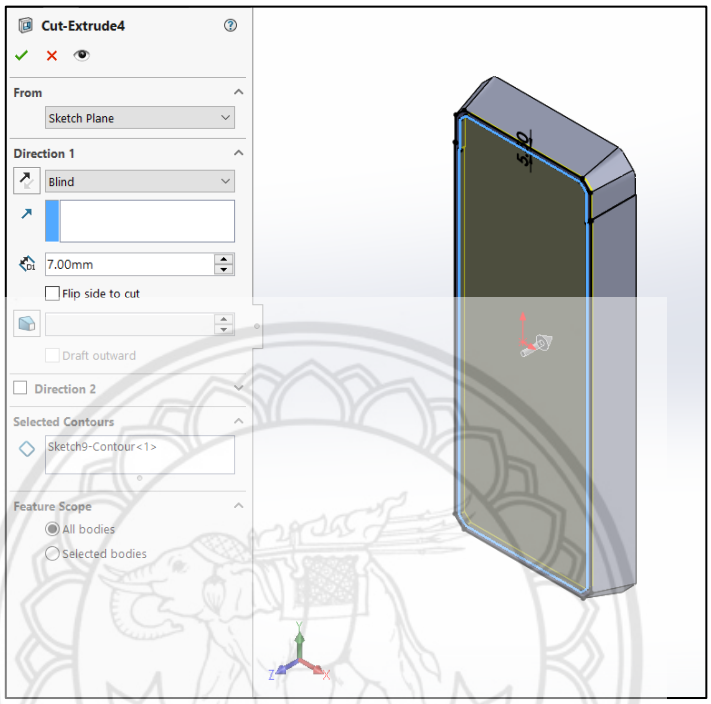


5.18 เลือกคำสั่ง Offset Entities จากเมนู และกำหนด Depth (ระยะของการ Offset) 5.50 mm จากนั้น คลิก OK

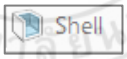


5.19 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut

และกำหนด Depth (ความลึกของการตัด) 7 mm แล้วคลิก OK

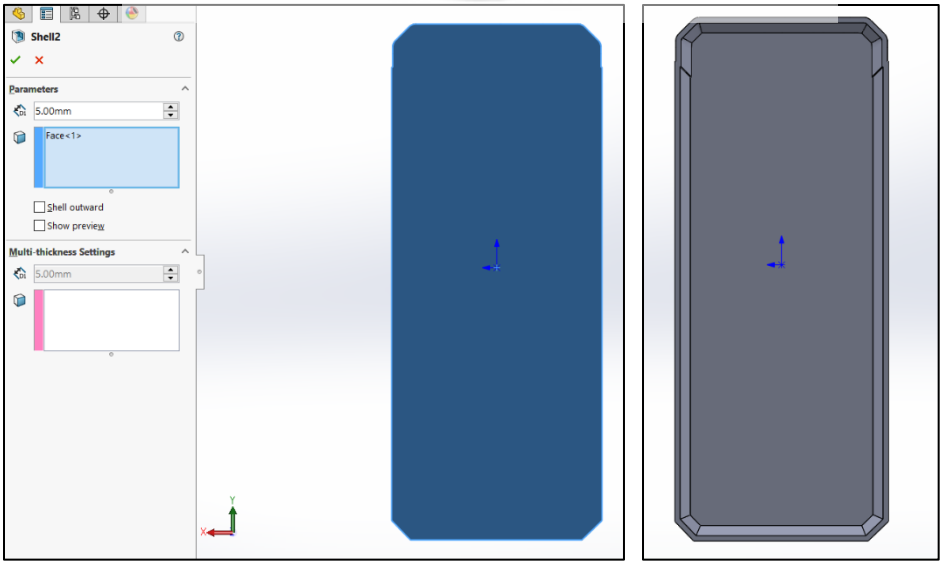


5.20 การ Shell ของแผงด้านหน้าเคส

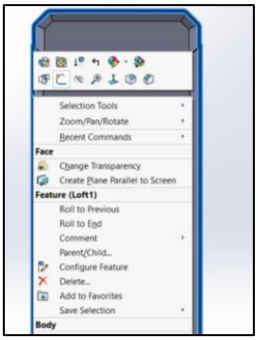
5.20.1 เลือกคำสั่ง Shell 

จากเมนู

5.20.2 เลือกพื้นที่ต้องการ Shell และกำหนด Depth (ความหนาของ Shell) 5 mm แล้วคลิก OK

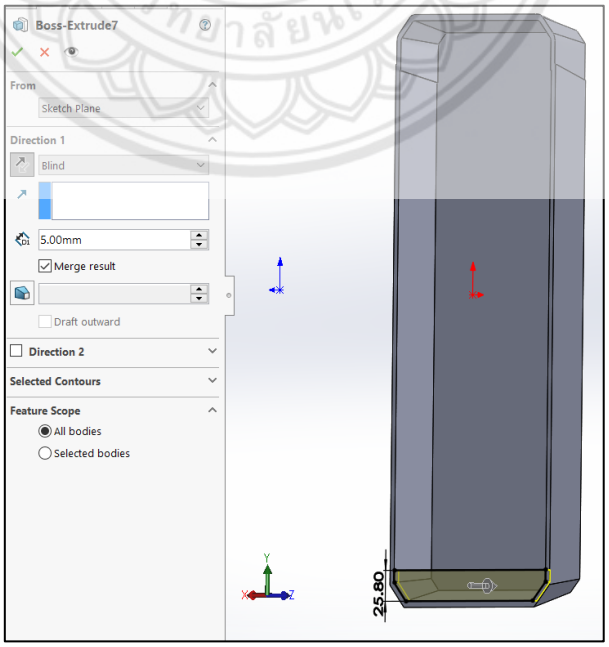


5.21 เลือกพื้นที่ด้านหลังของแผง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



5.22 เลือกคำสั่ง Line จากเมนูเพื่อสร้างเส้นที่ห่างจากพื้น 25.80 mm แล้วคลิก OK

5.23 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู แล้วเลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind กำหนด Depth (ความยาวของการ Extruded) 5 mm จากนั้นคลิก OK



6. การเจาะช่องสำหรับการผ่านของอากาศ

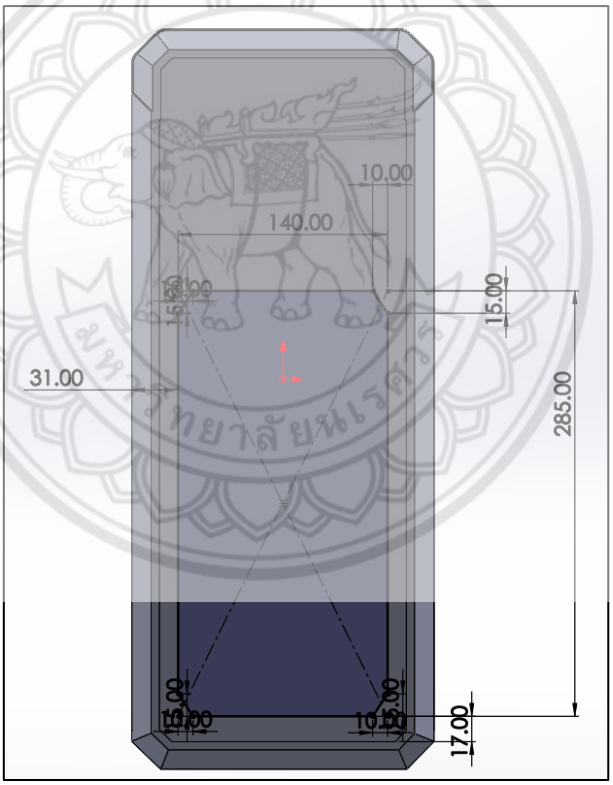
6.1 การเจาะรูอากาศด้านหน้า

6.1.1 เลือกพื้นที่ด้านหน้า แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

6.1.2 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

6.1.3 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 140 mm ยาว 285 mm ที่ห่างจากด้านข้างเคส 31 mm ห่างจากด้านล่างเคส 17 mm

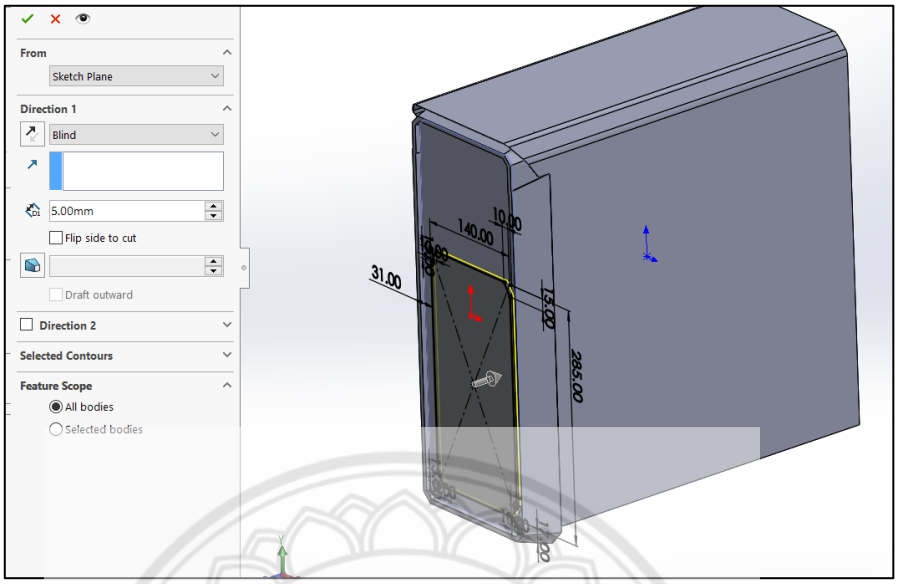
6.1.4 ลบมุมโดยเลือกคำสั่ง Fillet กำหนดให้ระยะ Fillet กว้าง 10 mm ยาว 15 mm จากนั้นคลิก OK



6.1.5 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut

จากเมนู

6.1.6 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ blind 1 mm แล้วคลิก OK

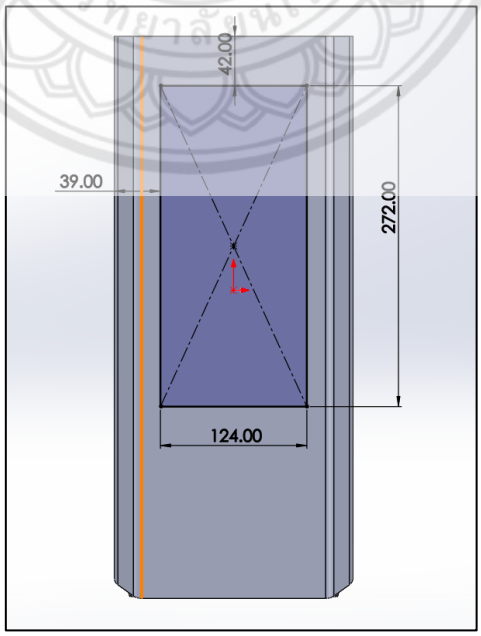


6.2 การเจาะรูอากาศด้านบน

6.2.1 เลือกพื้นที่ด้านบน แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

6.2.2 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

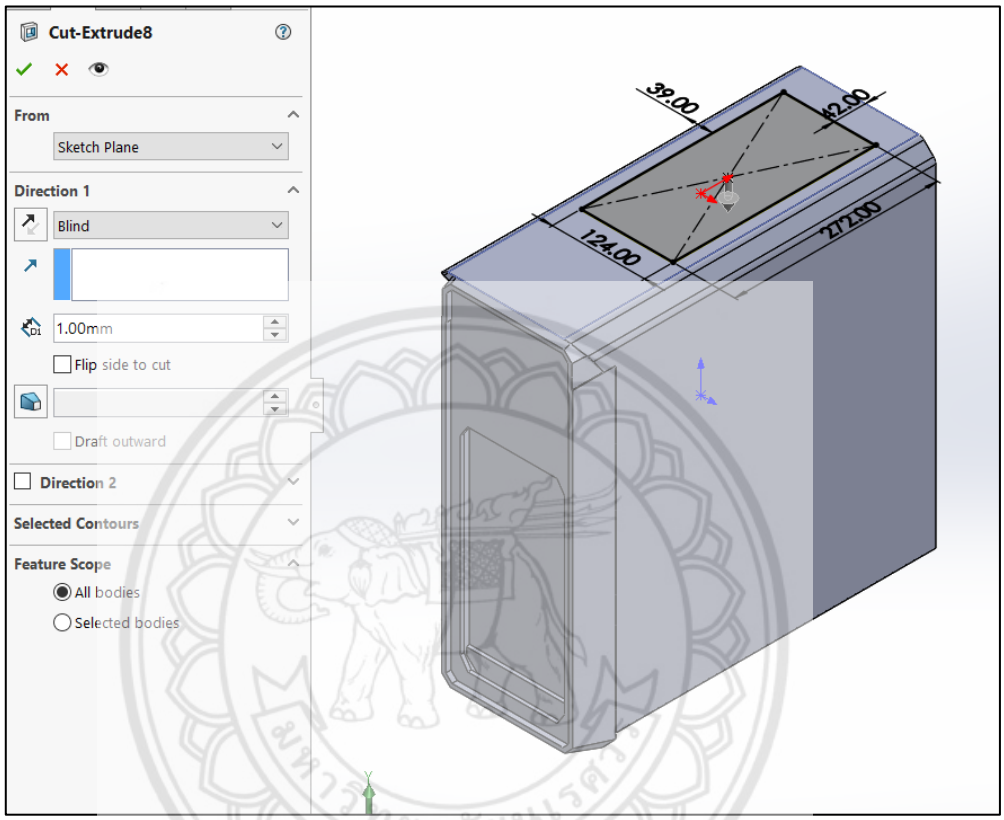
6.2.3 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 124 mm ยาว 272 mm ที่ห่างจากด้านข้างเคส 39 mm ห่างจากด้านหลังเคส 42 mm



6.2.4 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut

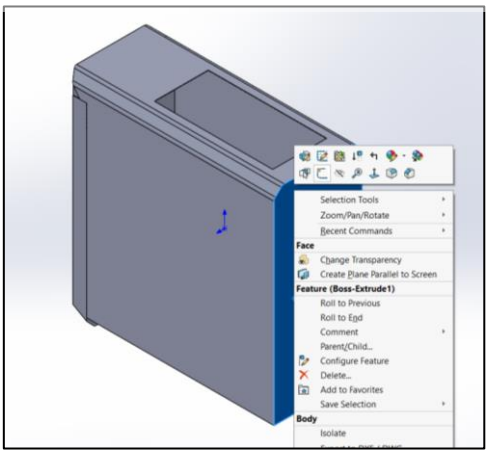
จากเมนู

6.2.5 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ blind 1 mm แล้วคลิก OK



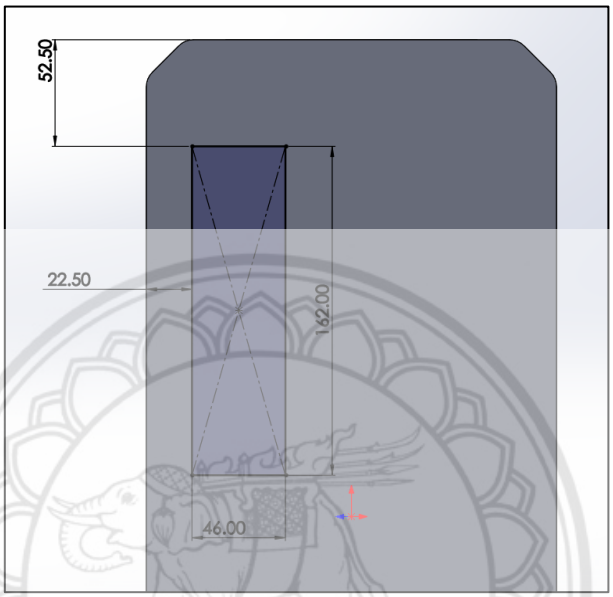
6.3 การเจาะรูอากาศด้านหลัง

6.3.1 เลือกพื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู

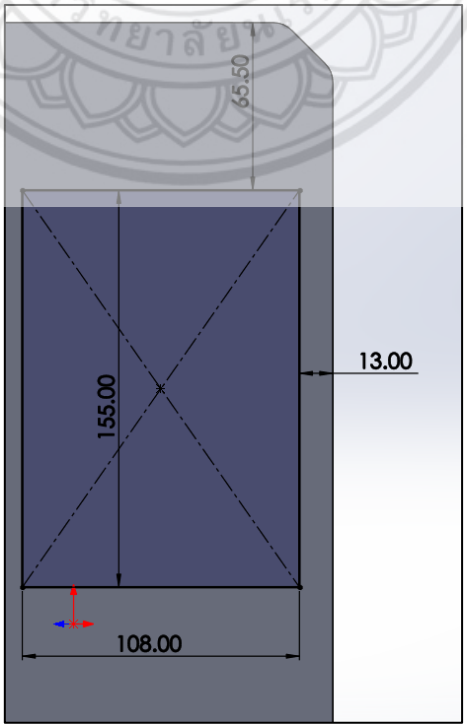


6.3.2 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

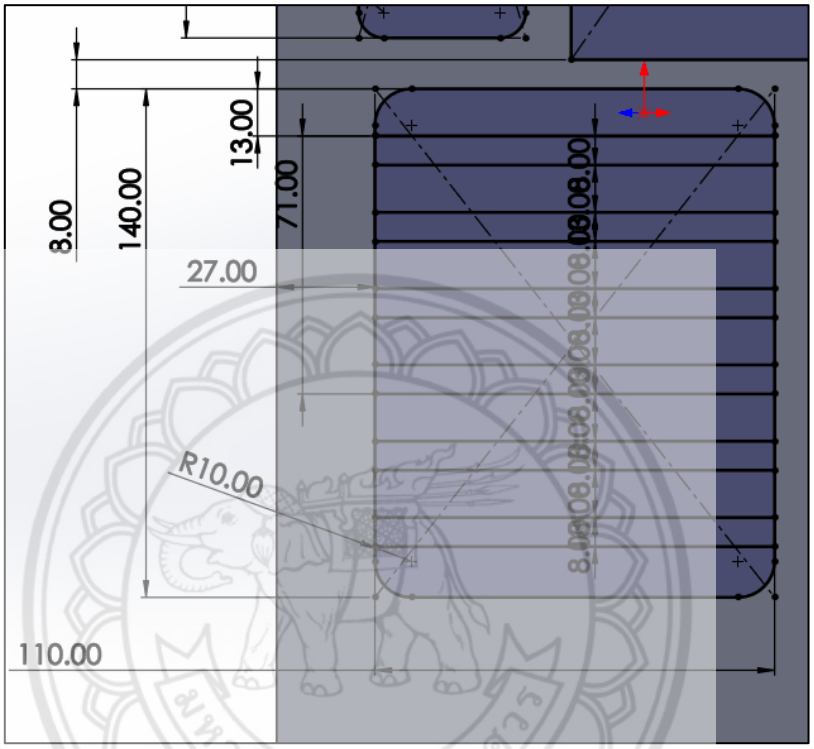
6.3.3 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 46 mm ยาว 162 mm ระยะจากด้านบน 52.50 mm ระยะจากด้านซ้าย 22.50 mm และลบมุมรัศมี 7 mm



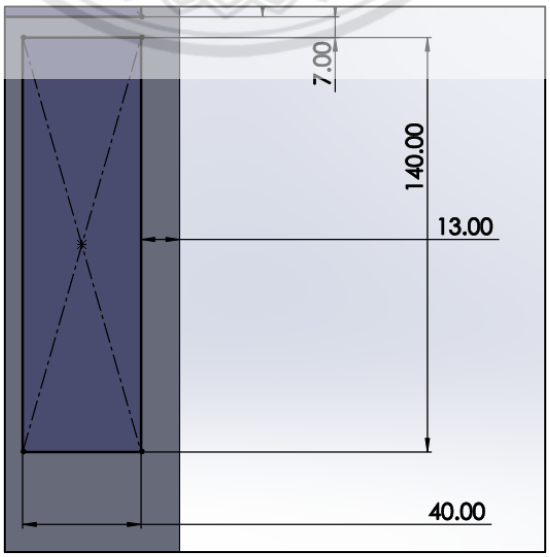
6.3.4 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 108 mm ยาว 155 mm ระยะจากด้านบน 65.50 mm ระยะจากด้านขวา 13 mm



6.3.5 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

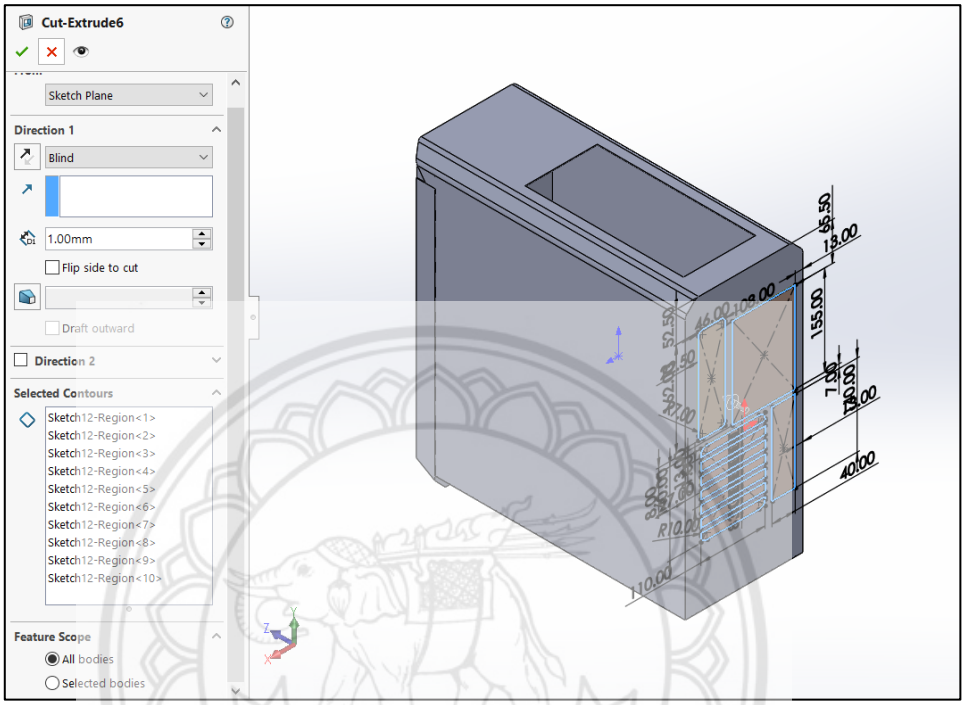


6.3.6 สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 40 mm ยาว 140 mm ระยะจากด้านล่าง 102.50 mm ระยะจากด้านขวา 13 mm



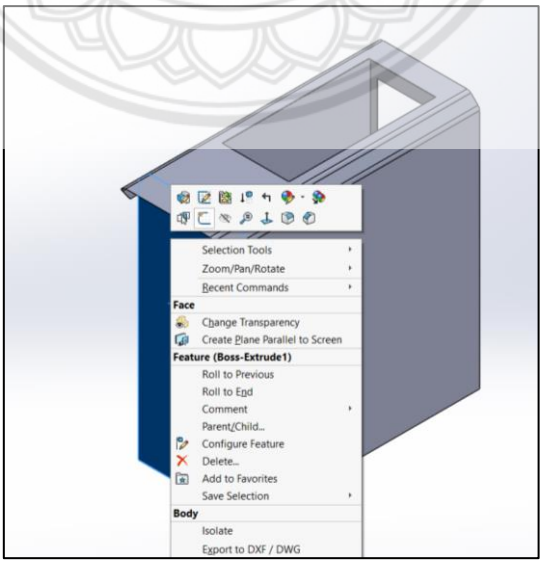
6.3.7 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut

จากเมนู เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ blind 1 mm จากนั้นคลิก OK



6.4 การเจาะรูอากาศด้านหน้า

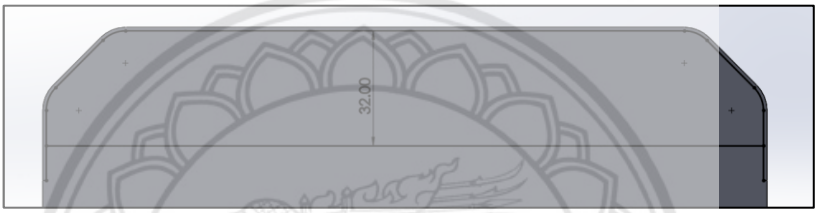
6.4.1 เลือกพื้นที่ด้านหน้า แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch
จากเมนู



6.4.2 เลือกคำสั่ง Convert Entities

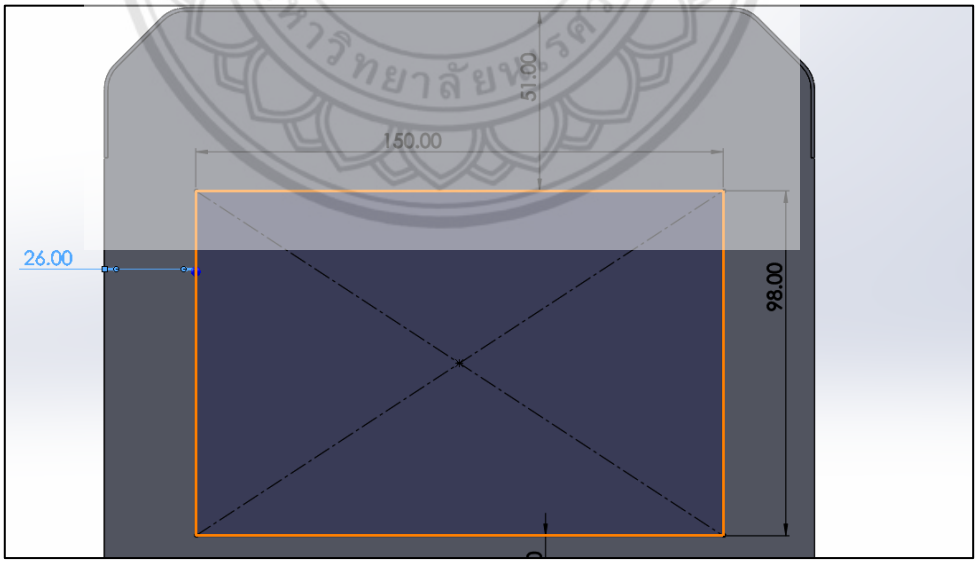
จากเมนู แล้วเลือกพื้นที่ด้านหน้าเคส

6.4.3 เลือกคำสั่ง Line จากเมนู สร้างเส้นที่มีระยะห่างจากด้านบน 32 mm

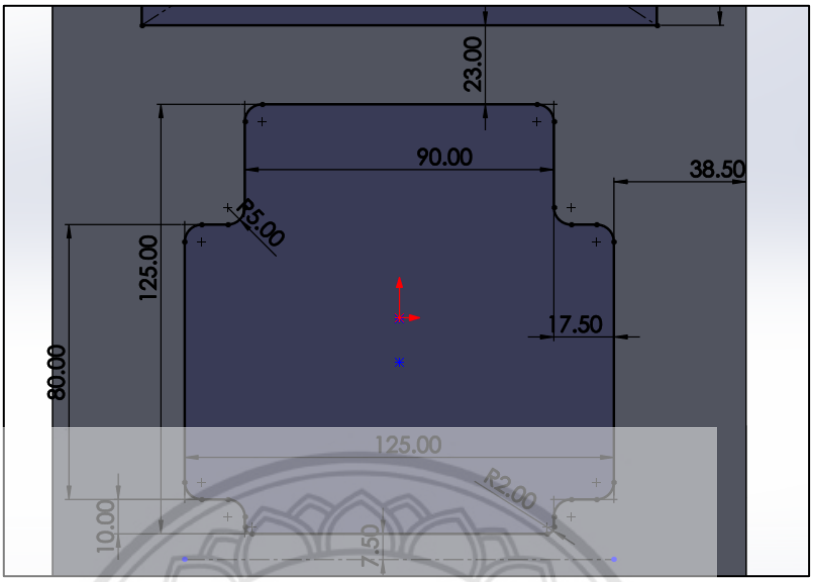


6.4.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู

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

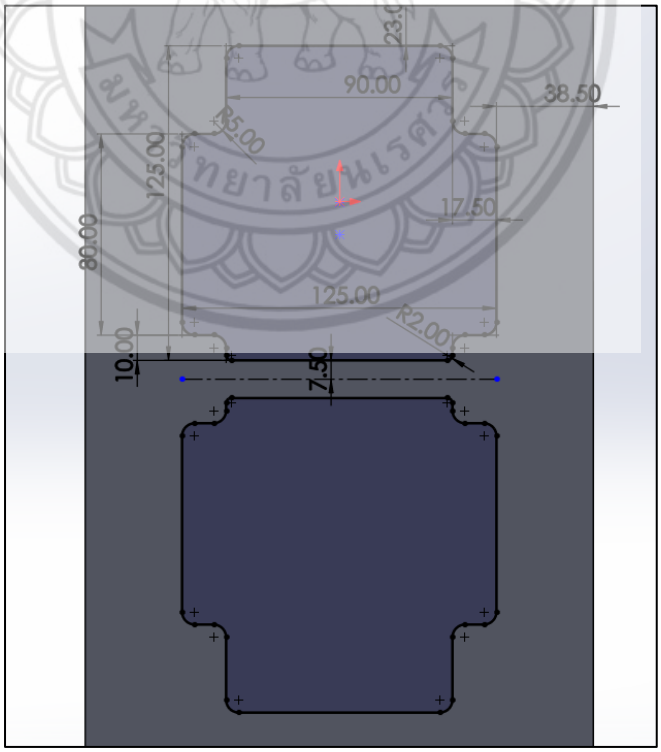


6.4.6 สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 90 mm ยาว 35 mm และ กว้าง 125 mm ยาว 80 mm ระยะจากด้านบน 23 mm ระยะจากด้านขวา 38.50 mm ลบมุม 5 mm กับ 2 mm



6.4.7 เลือกคำสั่ง Centerline สร้างเส้นเพื่อทำการ Mirror เป็นระยะ 7.50 mm

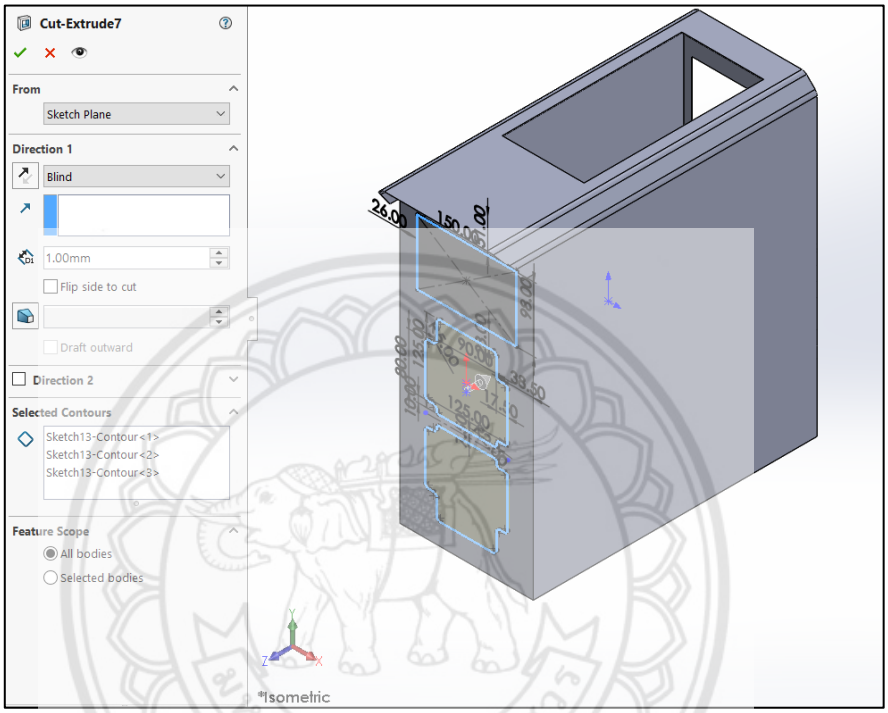
6.4.8 เลือกคำสั่ง Mirror Entities แล้วคลิก OK



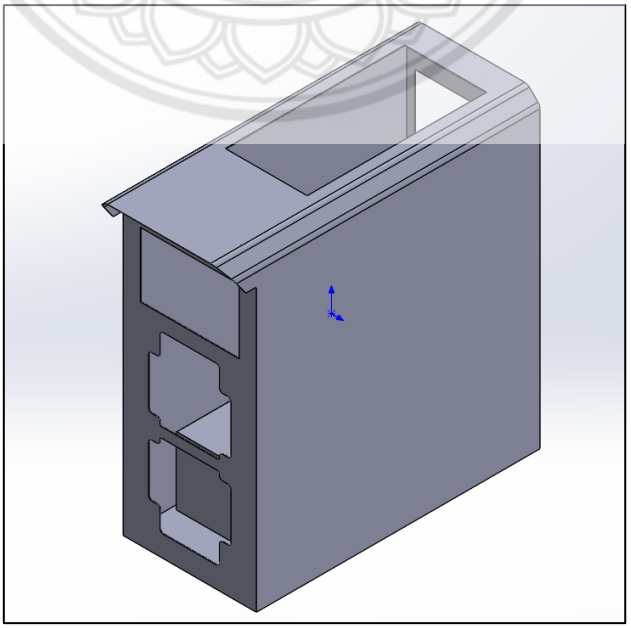
6.4.9 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded cut

จากเมนู

6.4.10 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการ ตัด) 1 mm

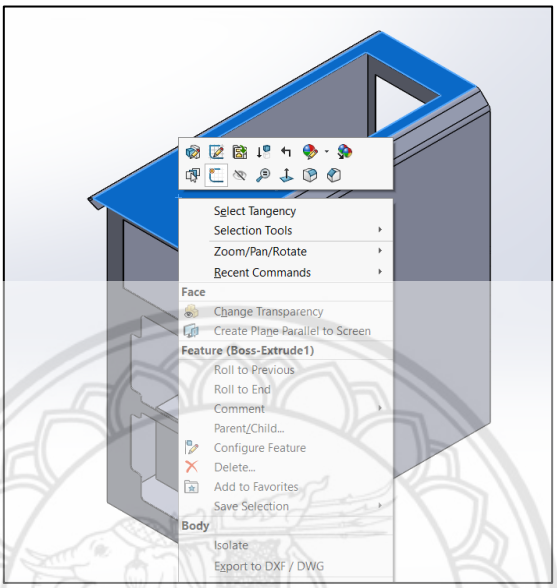


6.4.11 คลิก OK



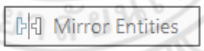
7. การสร้างวงกลมของพัดลม

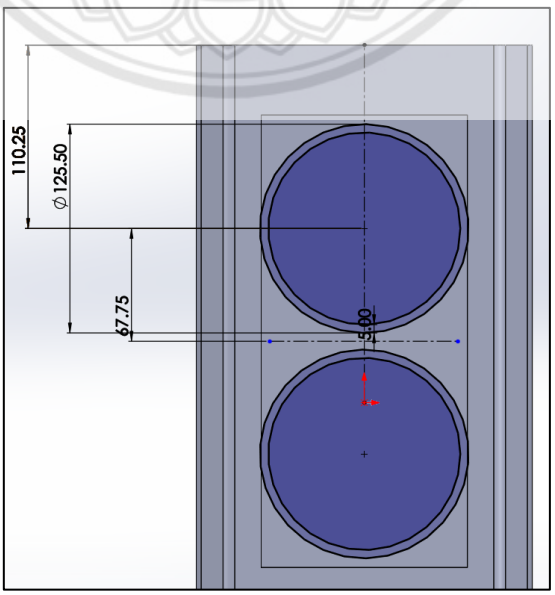
7.1 เลือกพื้นที่ด้านบนของเคส แล้วเลือกคำสั่ง Insert Sketch จากเมนู



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

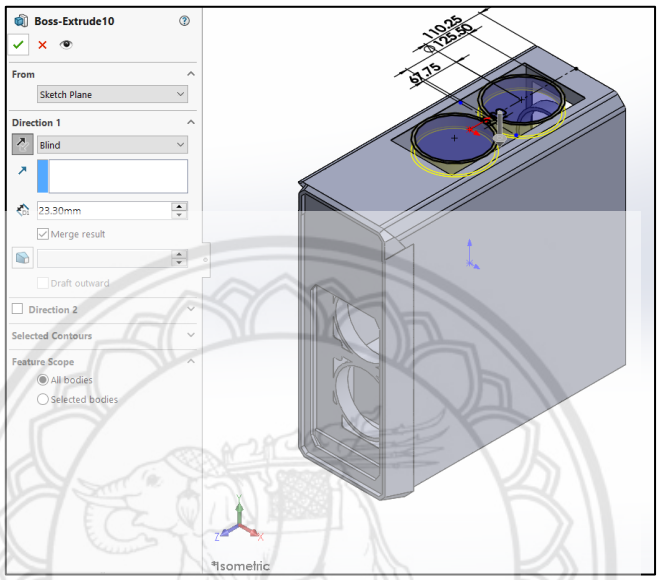
7.3 เลือกคำสั่ง Centerline สร้างเส้นเพื่อทำการ Mirror เป็นระยะ 5 mm

7.4 เลือกคำสั่ง Mirror Entities  จากเมนู แล้วคลิก OK

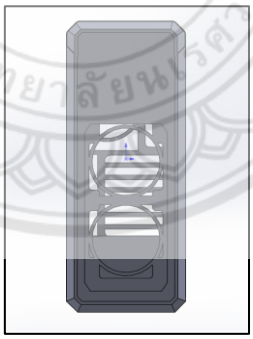


7.5 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

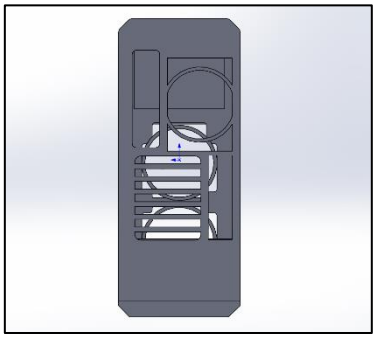
7.6 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 23.30 mm แล้วคลิก OK



7.7 สร้างวงกลมเหมือนข้างต้นเพิ่ม 2 Circle ให้อยู่ระหว่างช่องว่างด้านหน้าเคส



7.8 สร้างวงกลมเหมือนข้างต้นเพิ่ม 1 Circle ให้อยู่ระหว่างช่องว่างด้านหลังเคส



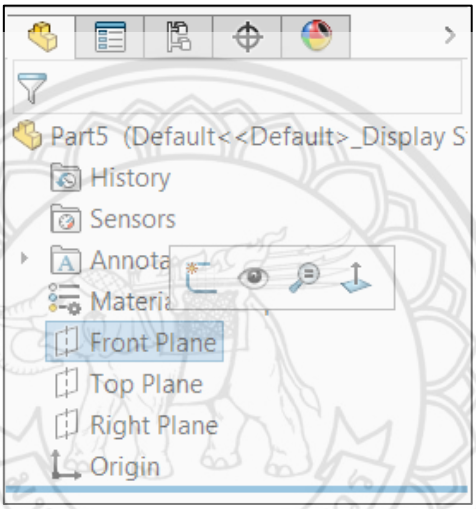
การสร้างเมนบอร์ด (Mainboard)

1. การสร้างแผ่น PCB

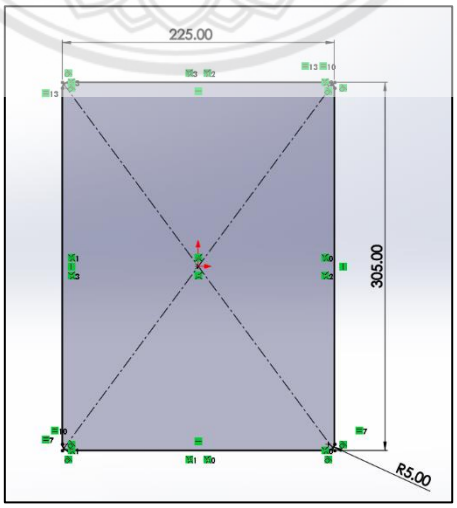
1.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

1.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

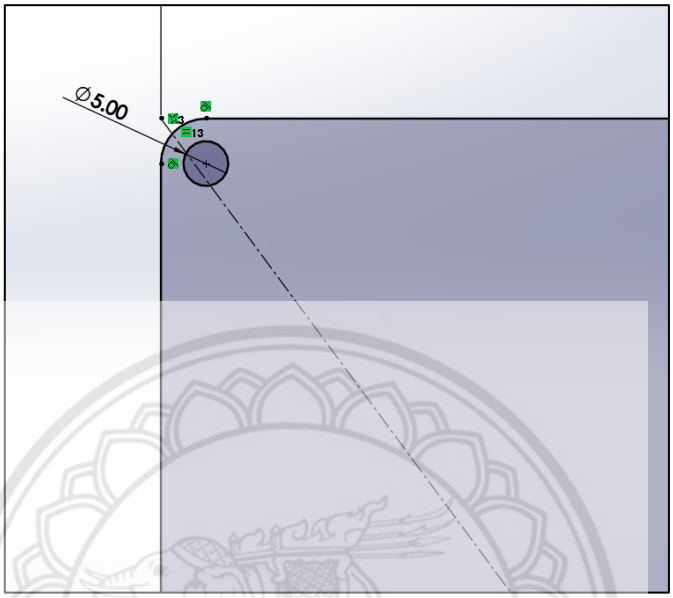
1.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



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



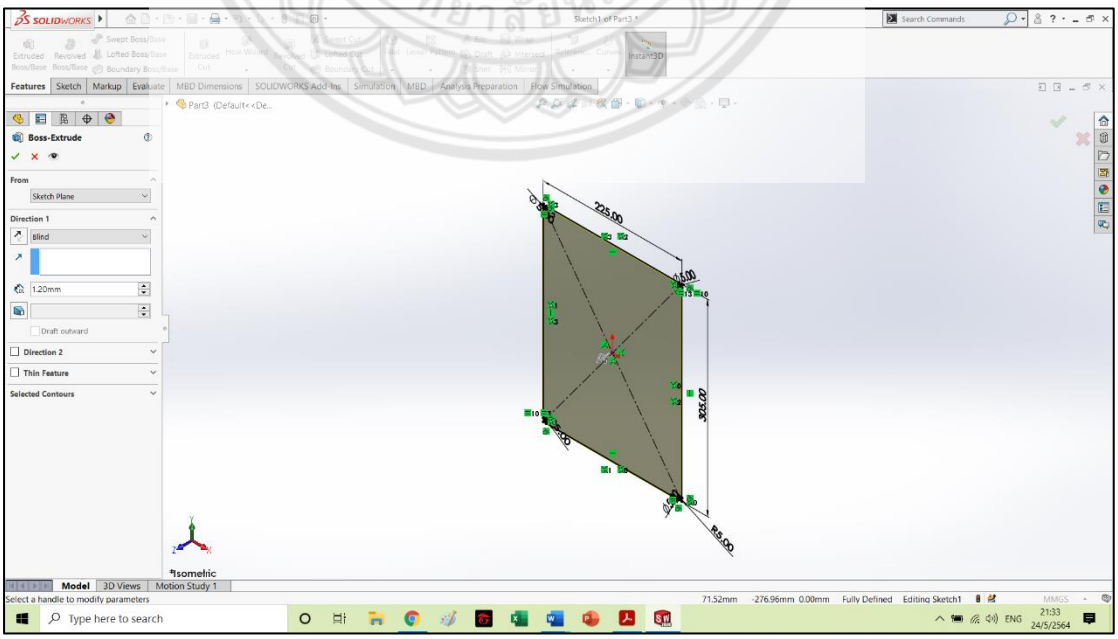
1.5 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู สร้างวงกลม 4 วง และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลาง) 5 mm



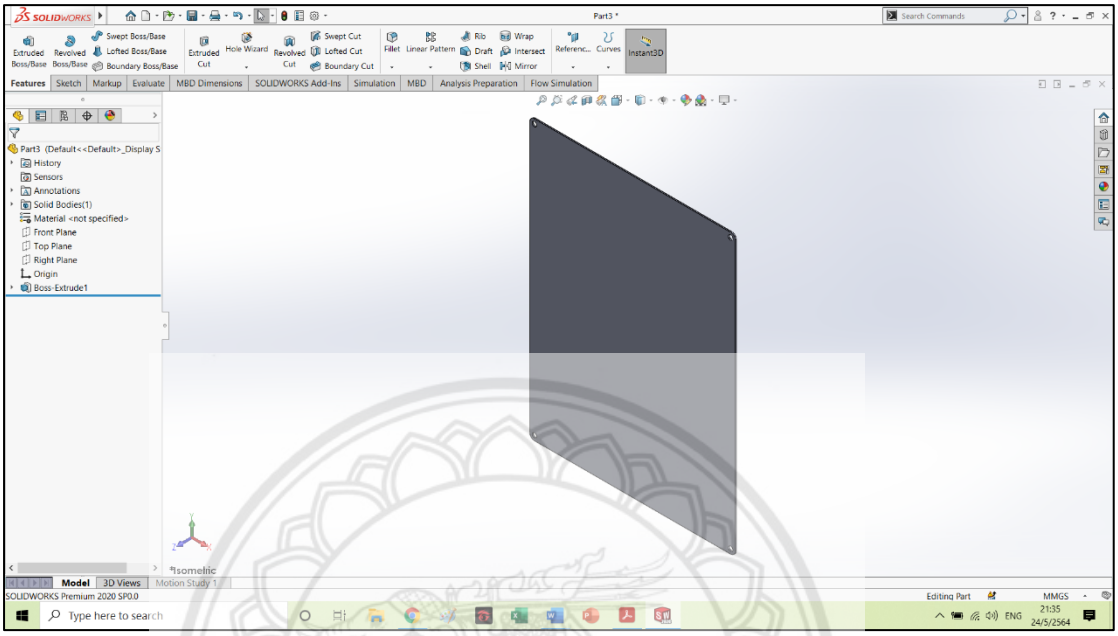
1.6 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

1.7 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

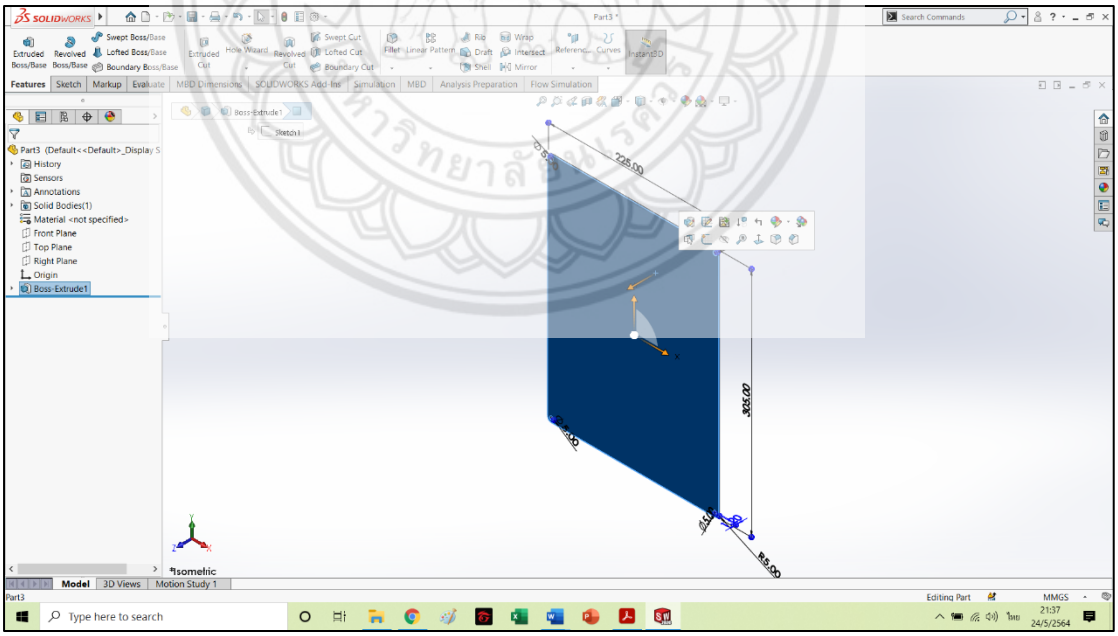
1.8 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



1.9 คลิก OK

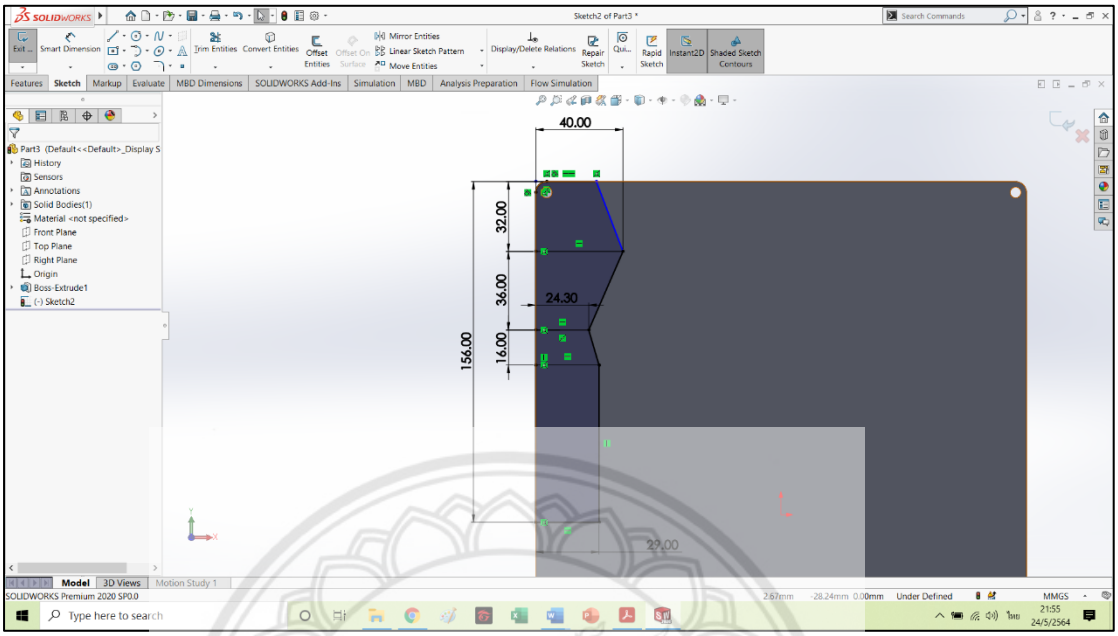


1.10 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



1.11 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

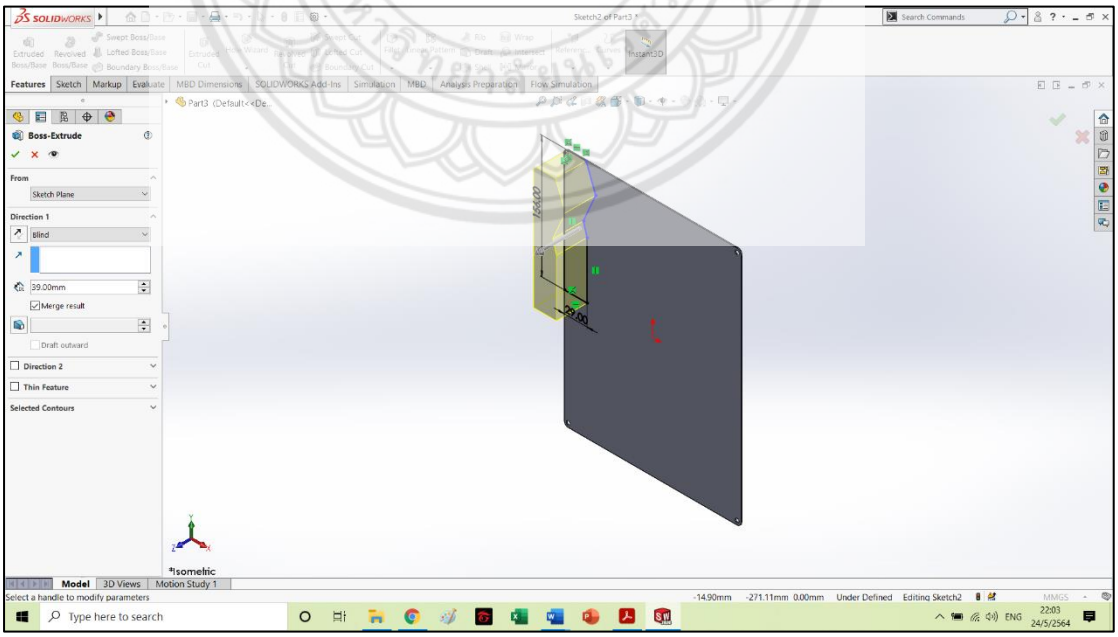
1.12 เลือกคำสั่ง Line สร้างเส้นดังนี้



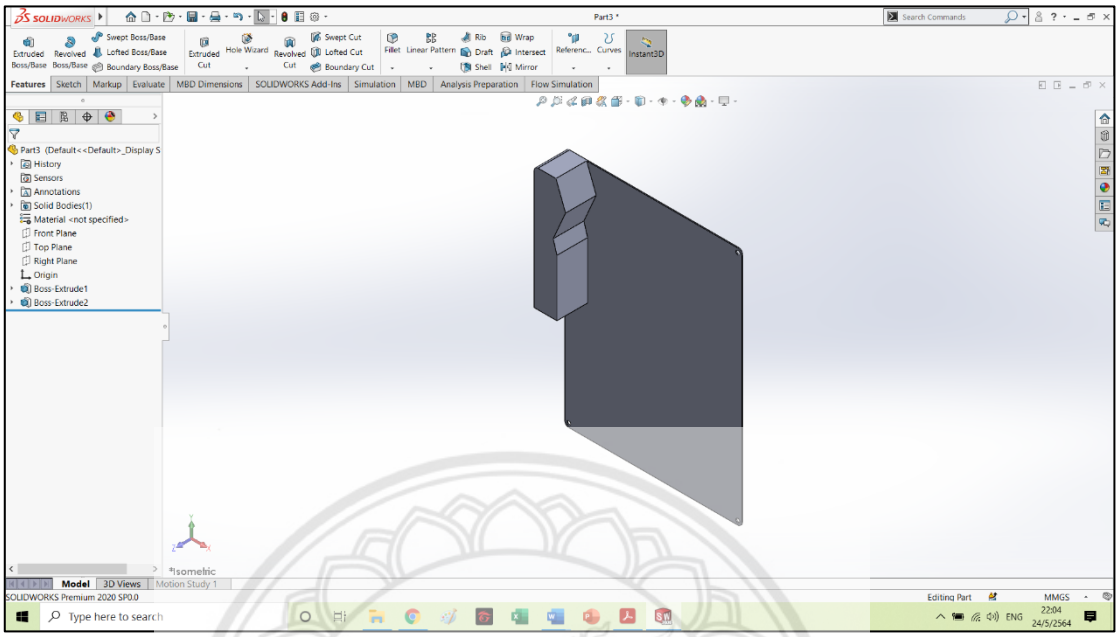
1.13 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

1.14 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

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



1.16 คลิก OK

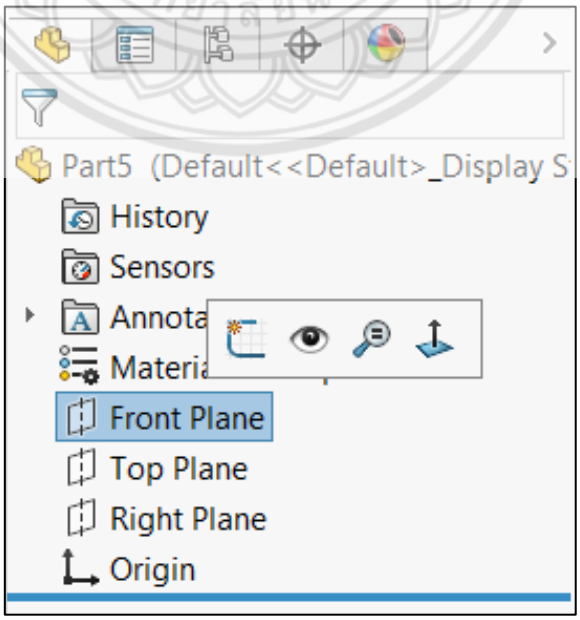


2. การสร้าง CPU

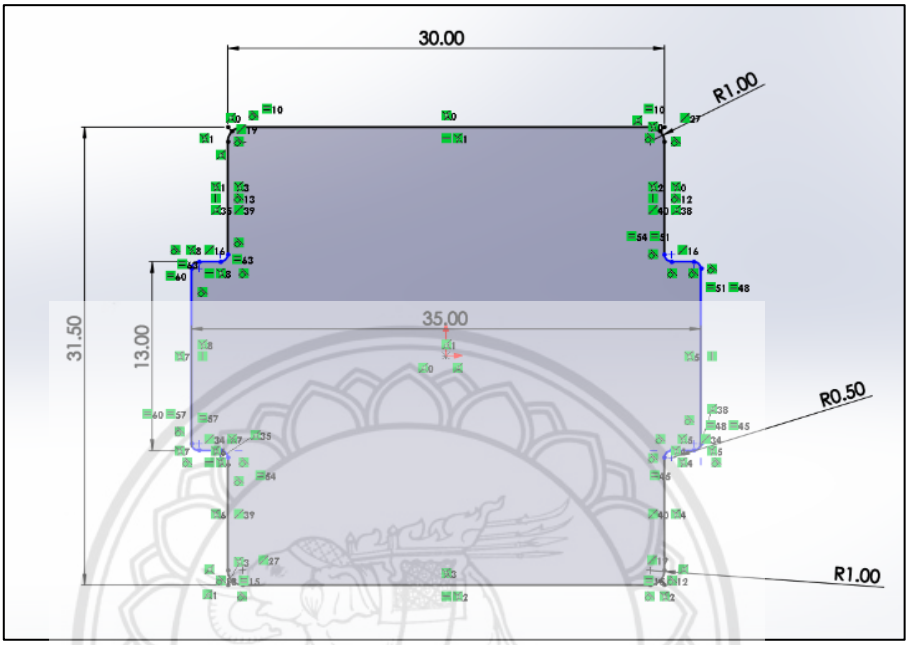
2.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

2.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

2.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



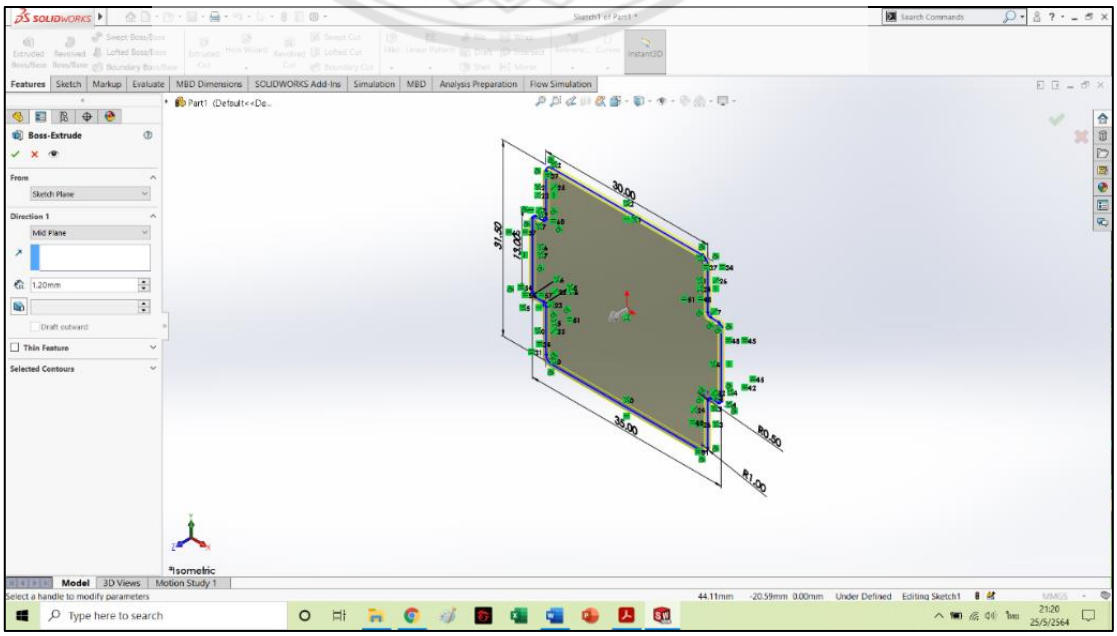
2.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 30 mm ยาว 13 mm และกว้าง 35 mm ยาว 13 mm ลบมุมรัศมี 1 mm กับ 0.5 mm



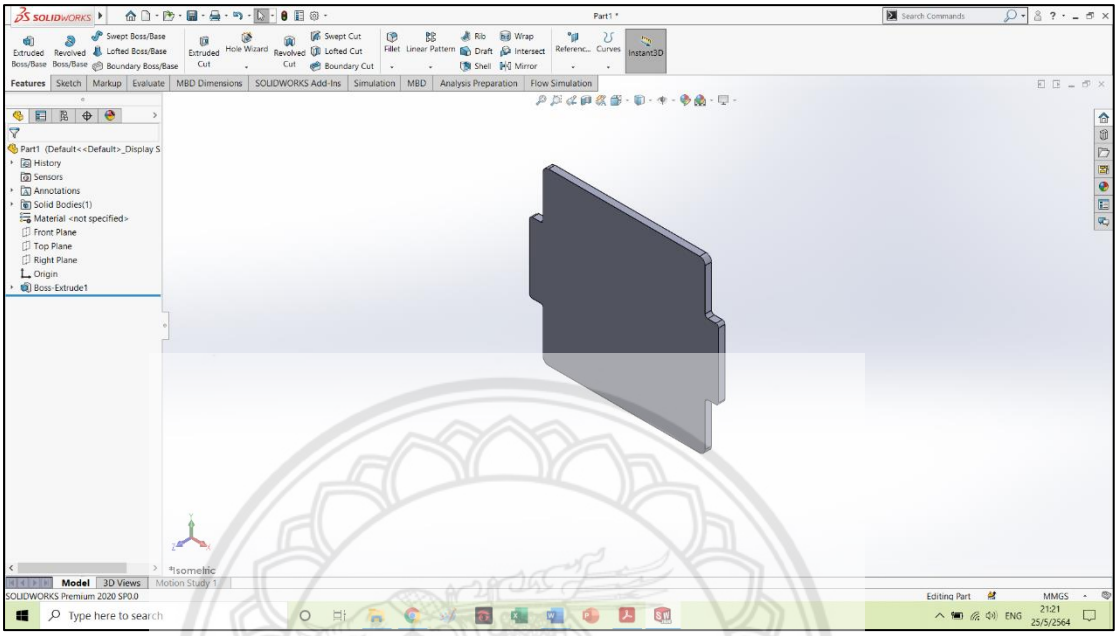
2.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

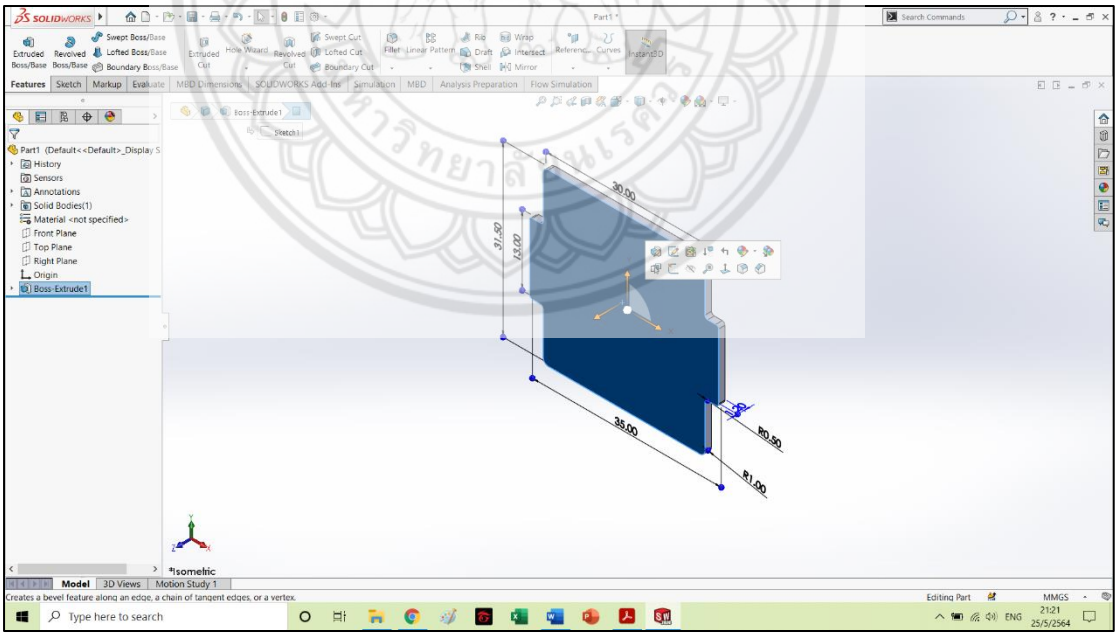
2.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



2.8 คลิก OK

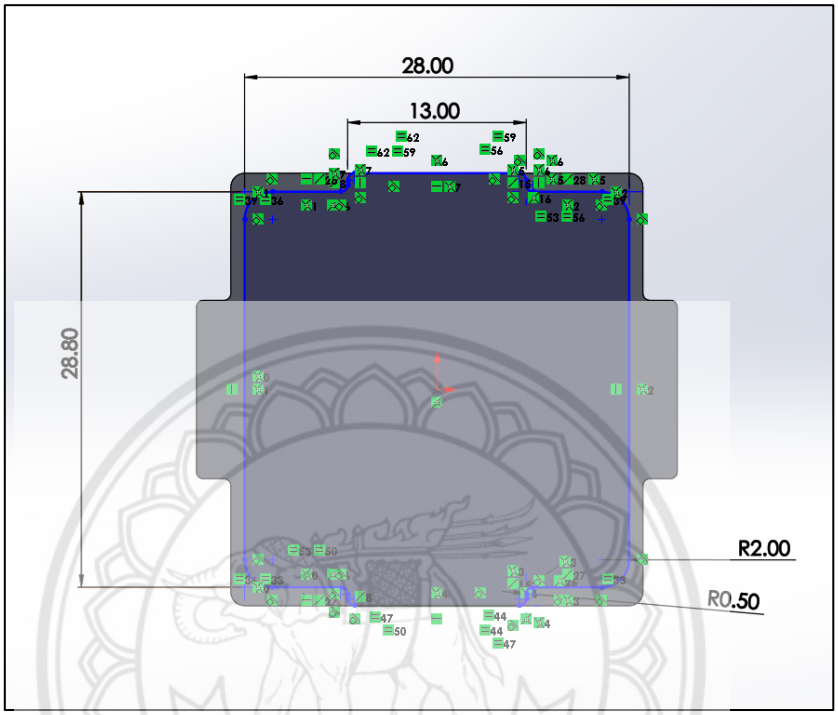


2.9 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



2.10 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

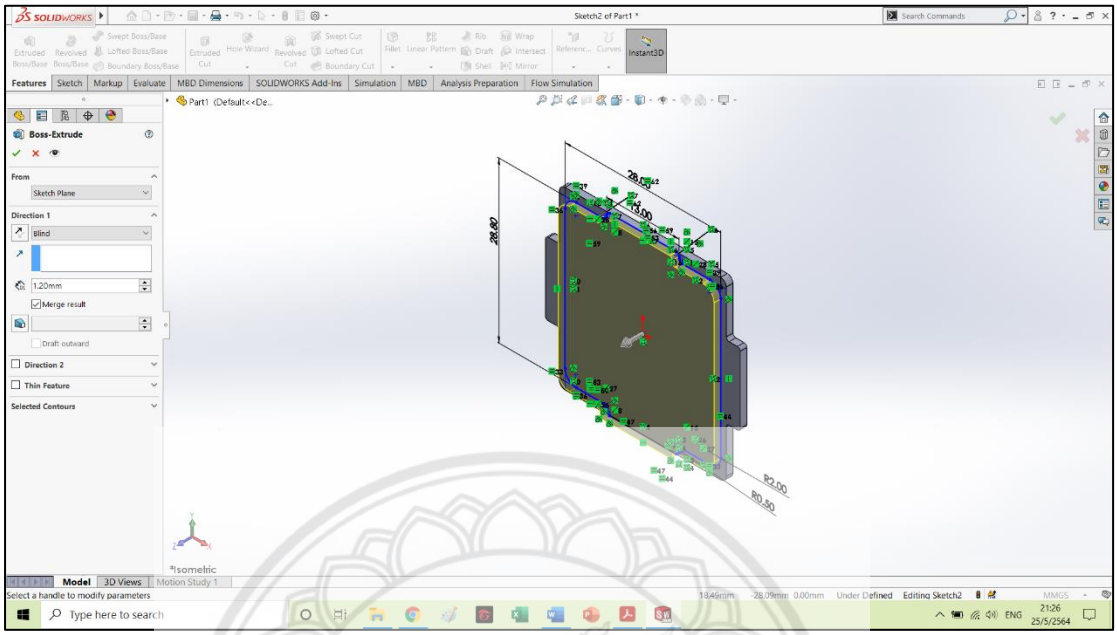
2.11 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม 2 รูป กว้าง 28 mm ยาว 28.80 mm และกว้าง 13 mm ยาว 31.50 mm ลบมุมรัศมี 2 mm กับ 0.5 mm



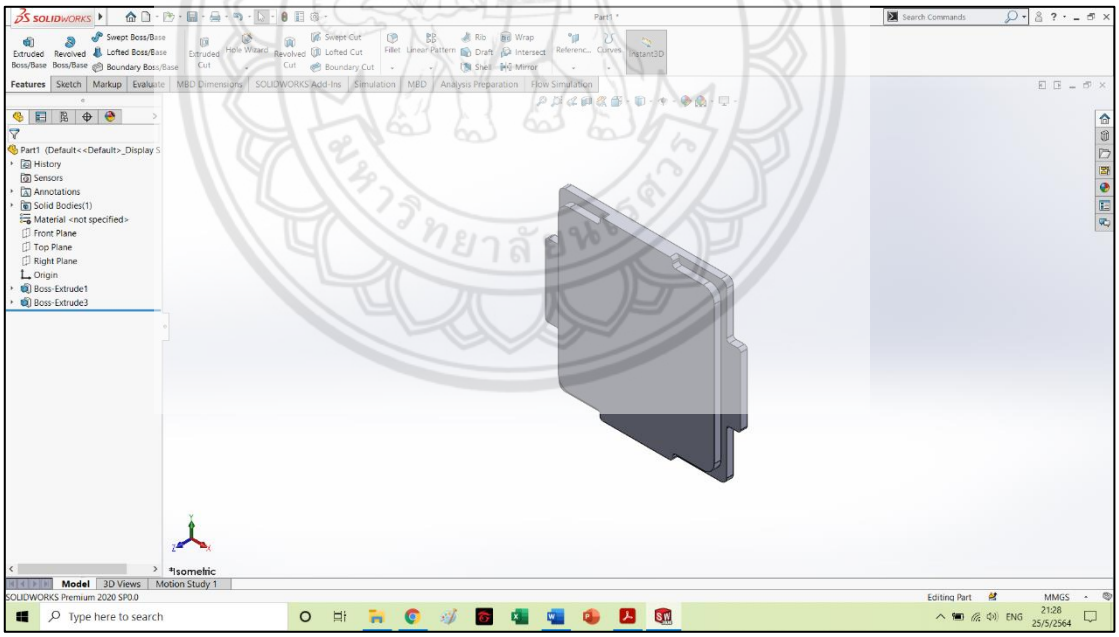
2.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

2.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

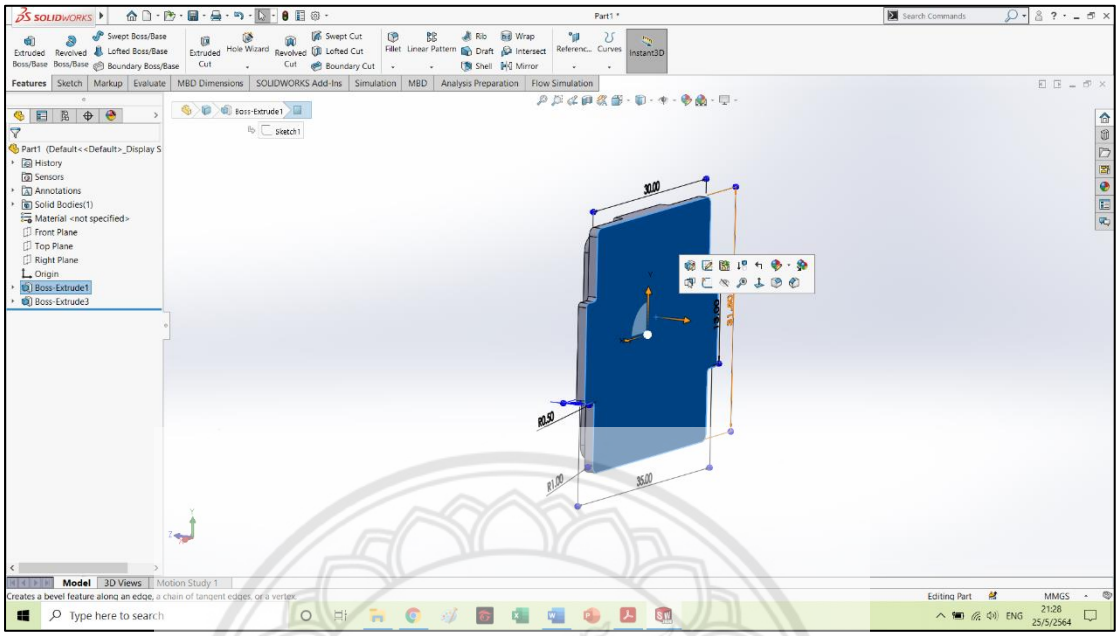
2.14 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการตัด) 1.20 mm



2.15 คลิก OK



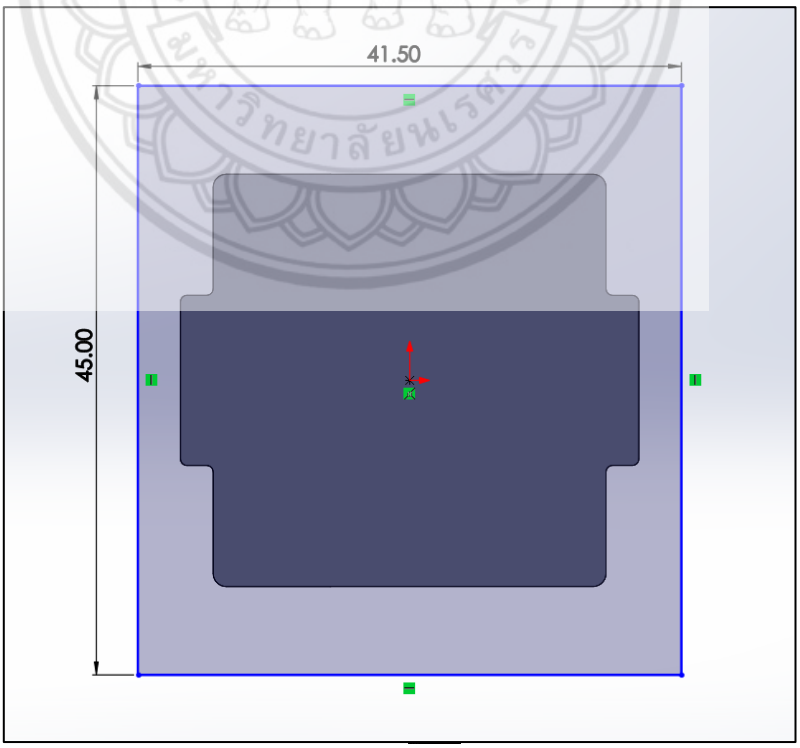
2.16 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



2.17 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

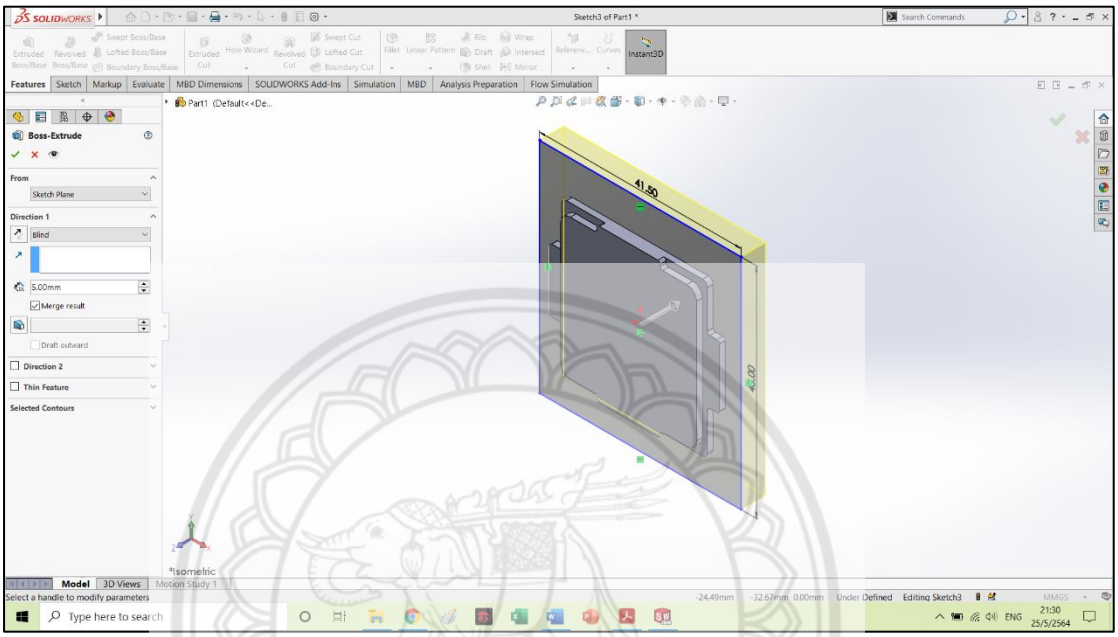
2.18 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 41.50 mm ยาว 45 mm

2.19

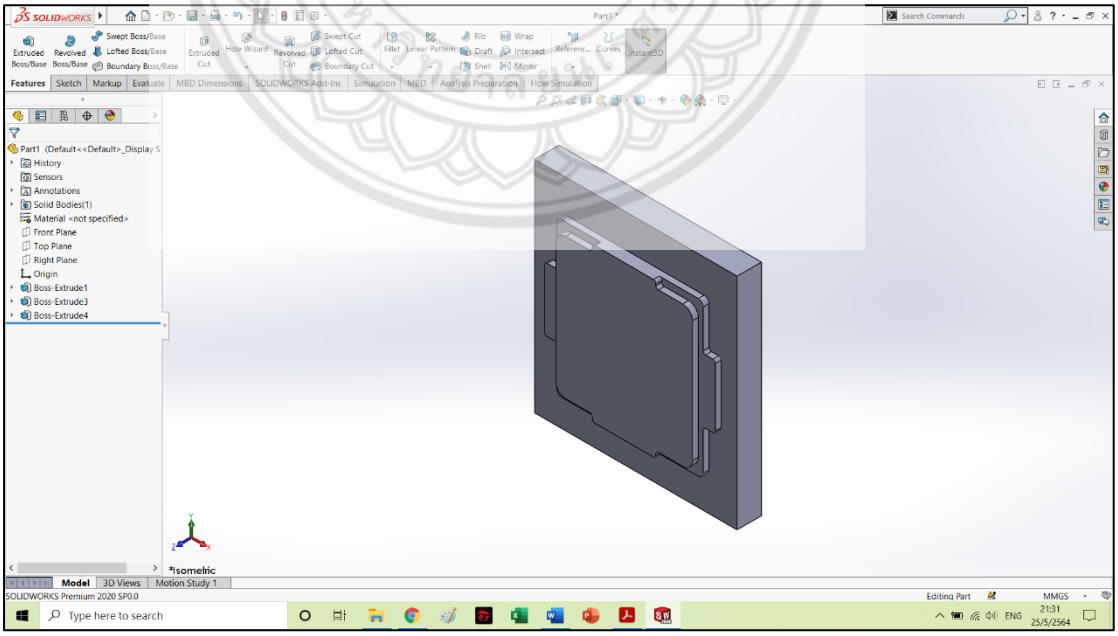


2.20 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

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



2.22 คลิก OK

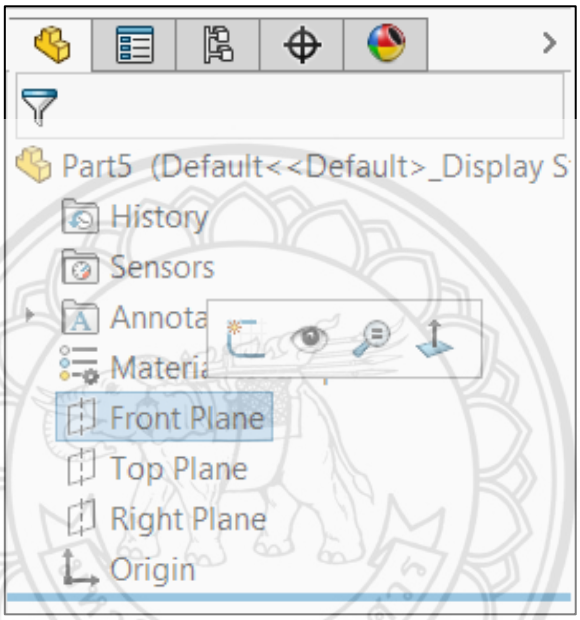


3. การสร้างภาคจ่ายไฟของ CPU

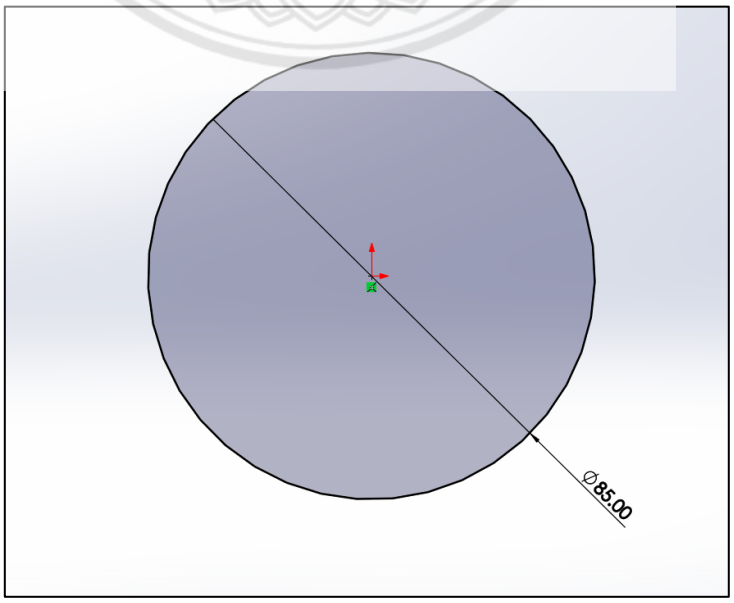
3.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

3.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

3.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



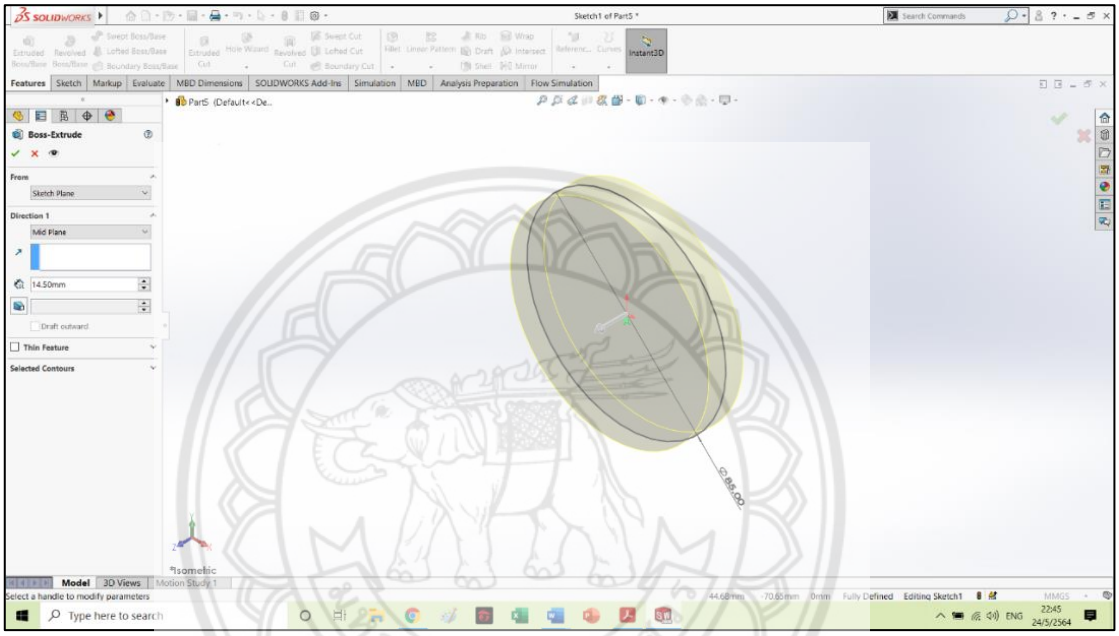
3.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 85 mm



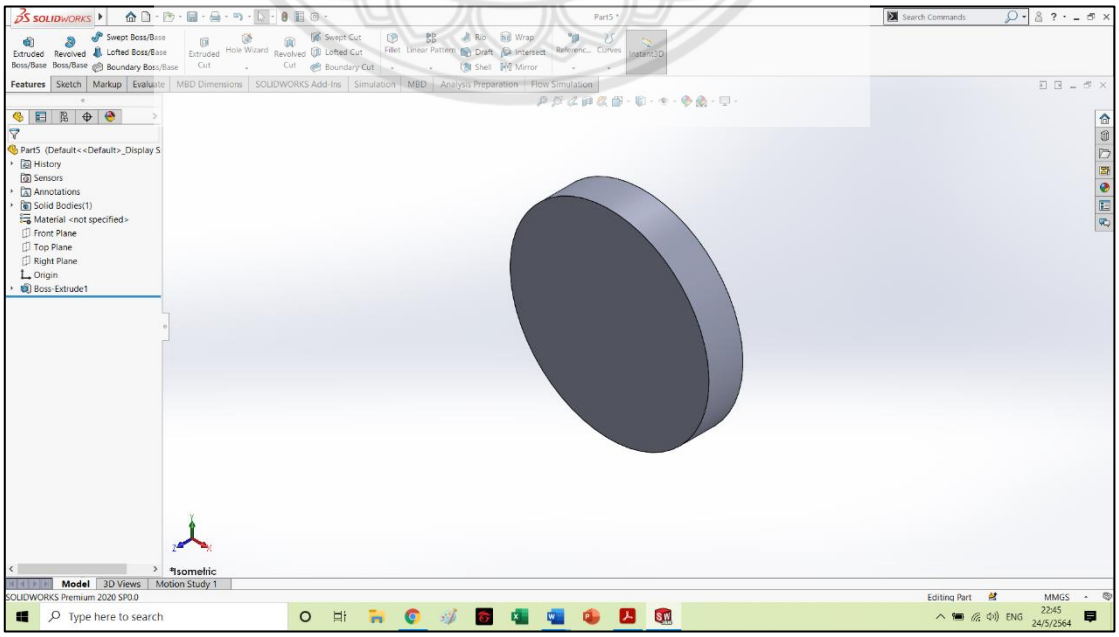
3.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

3.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

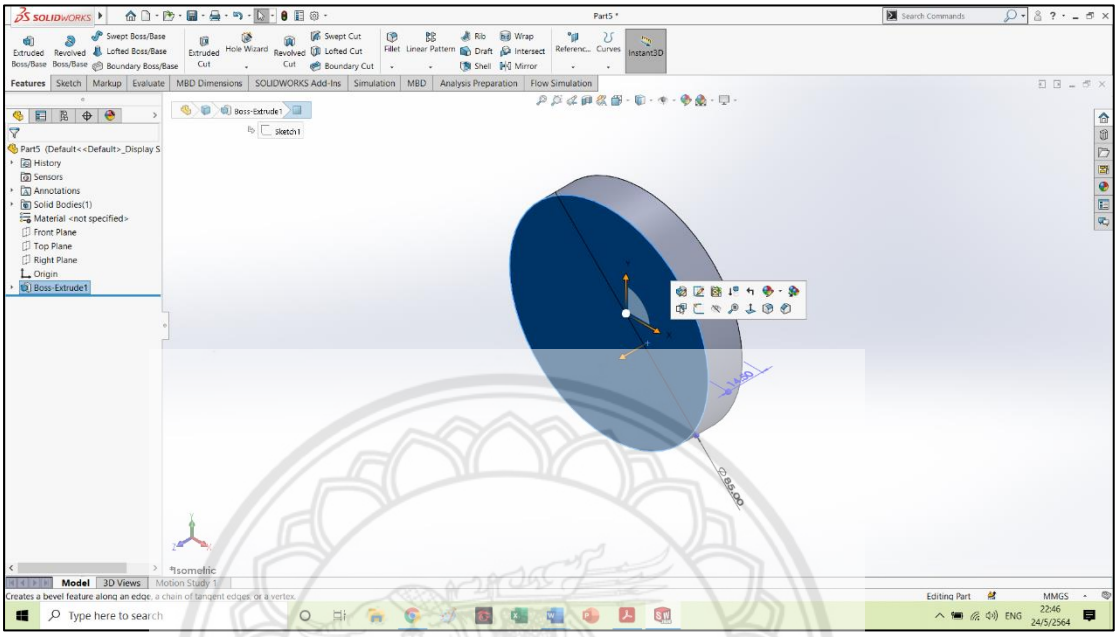
3.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 14.50 mm



3.8 คลิก OK

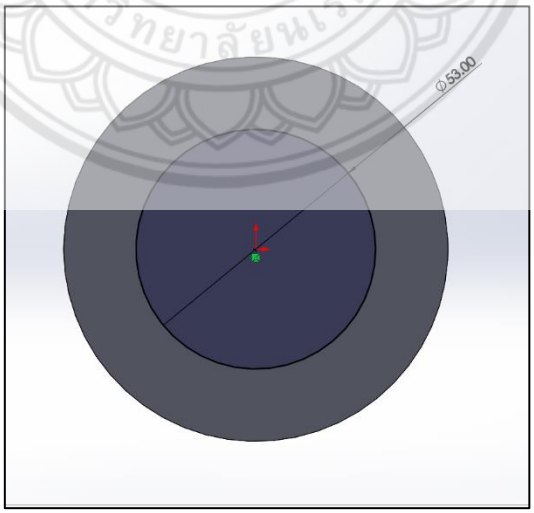


3.9 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



3.10 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Normal To

3.11 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 53 mm

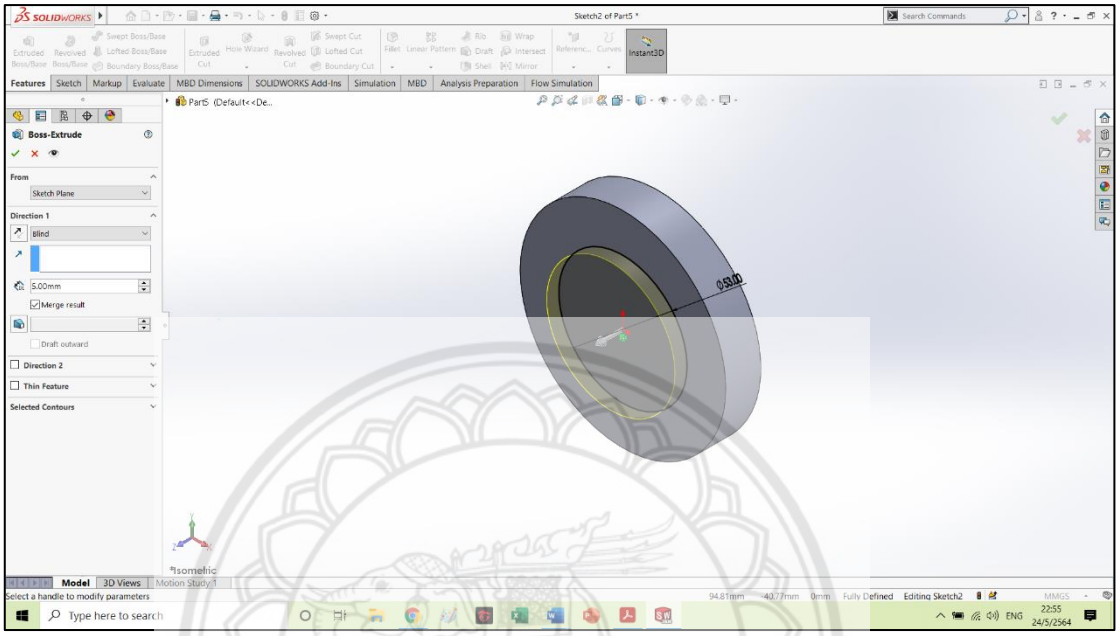


3.12 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

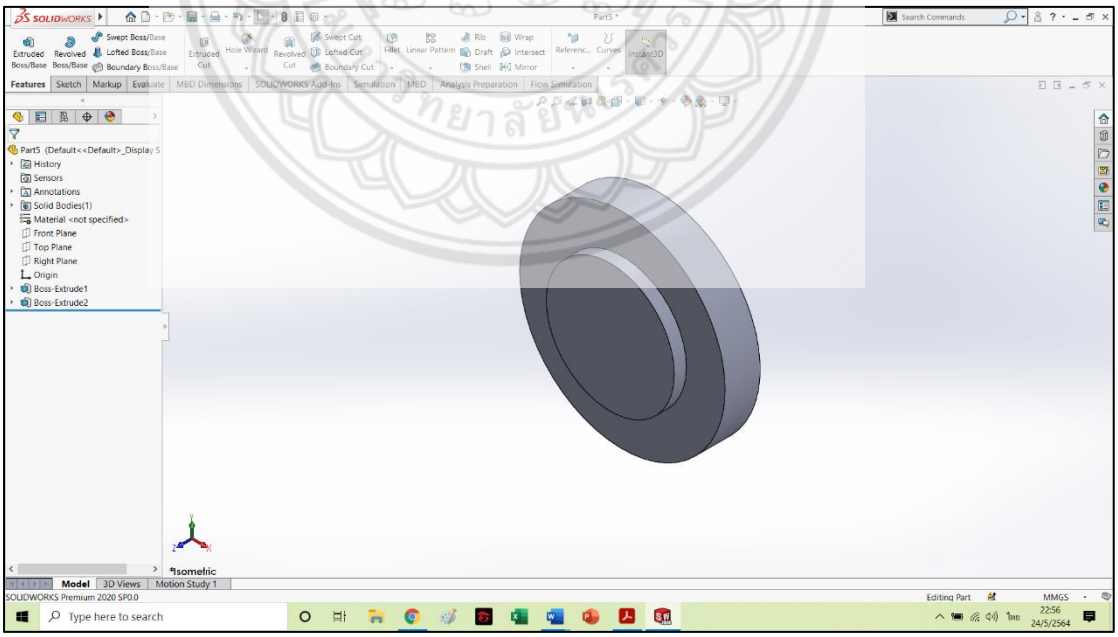
3.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base

จากเมนู

3.14 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 5 mm



3.15 คลิก OK

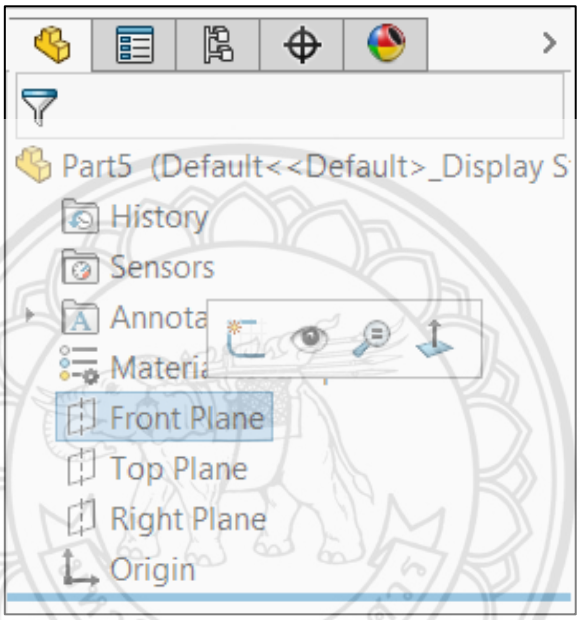


4. การสร้างภาคจ่ายไฟขนาดใหญ่

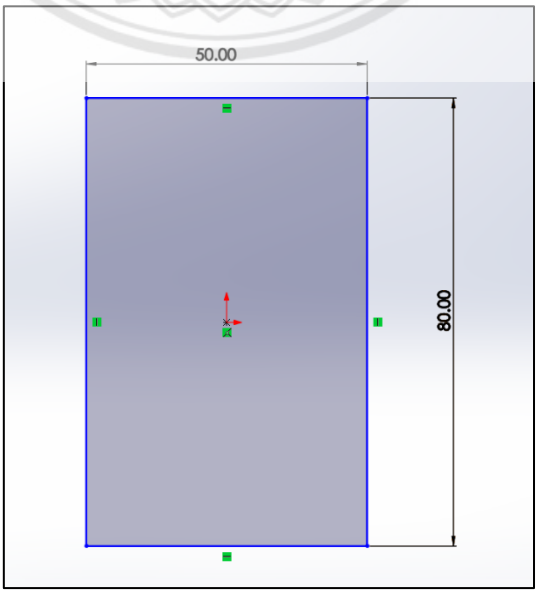
4.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

4.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

4.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



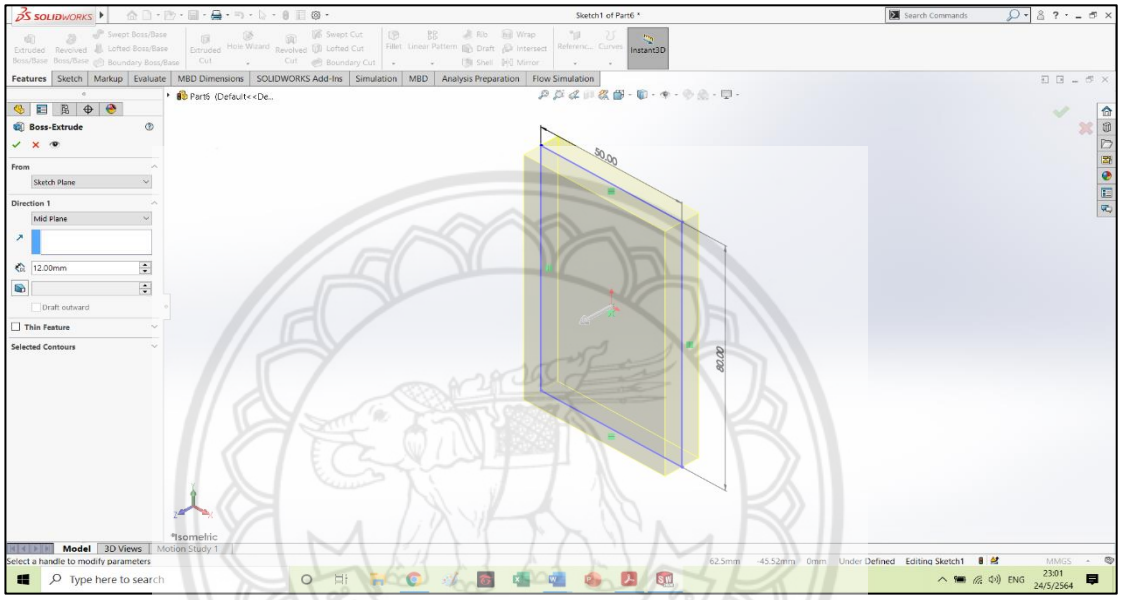
4.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 50 mm ยาว 80 mm



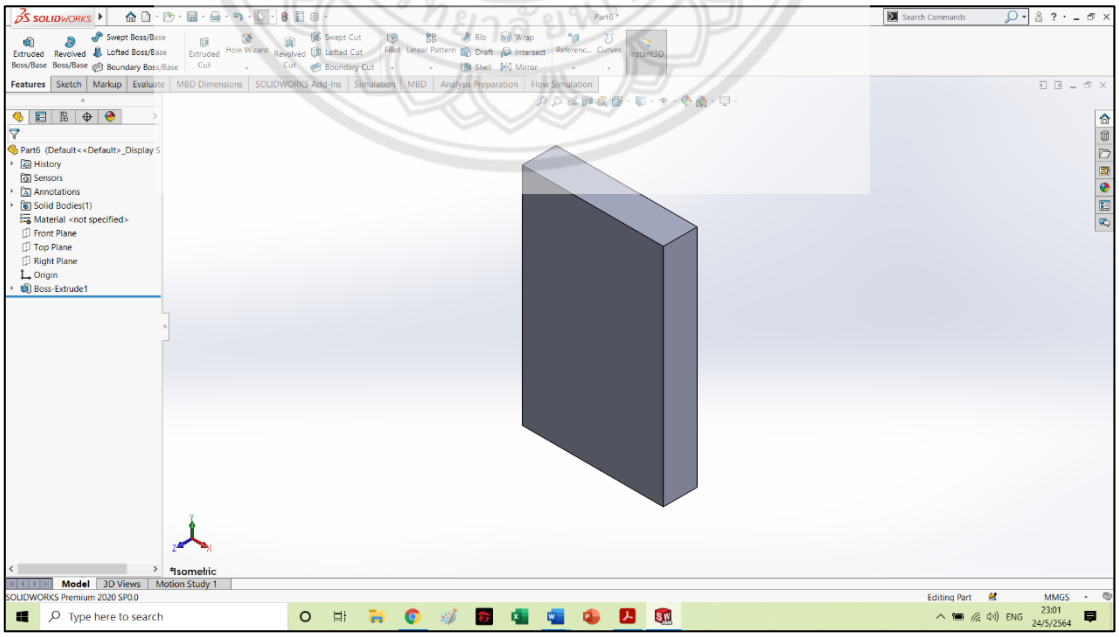
4.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

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

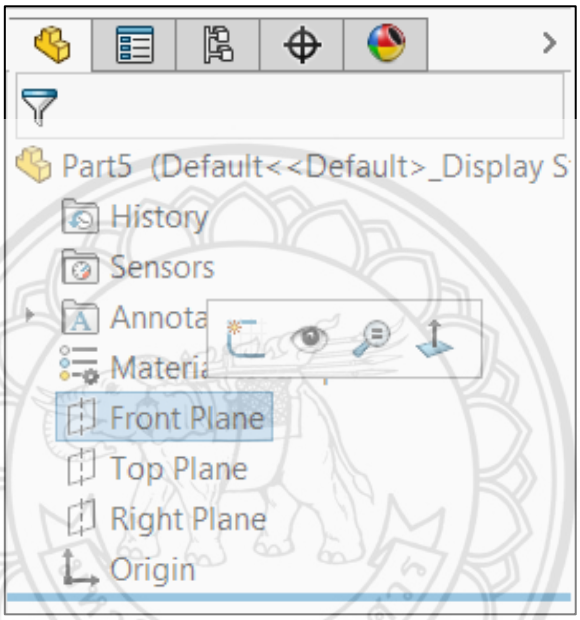


5. การสร้างภาคจ่ายไฟขนาดกลาง

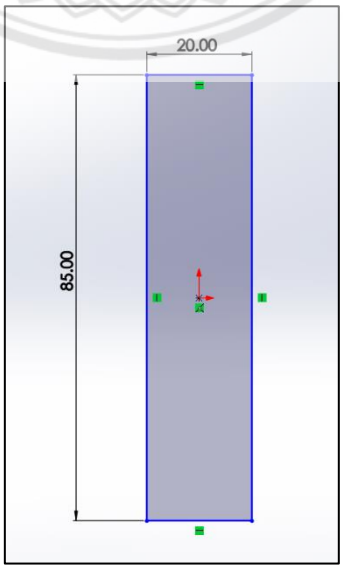
5.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

5.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

5.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



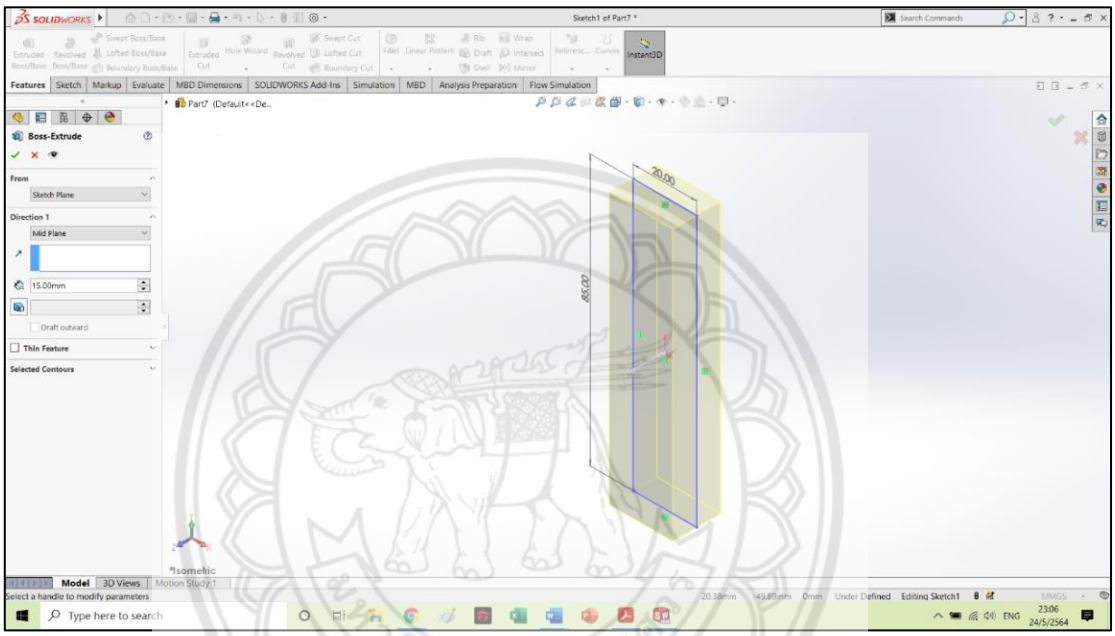
5.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 20 mm ยาว 85 mm



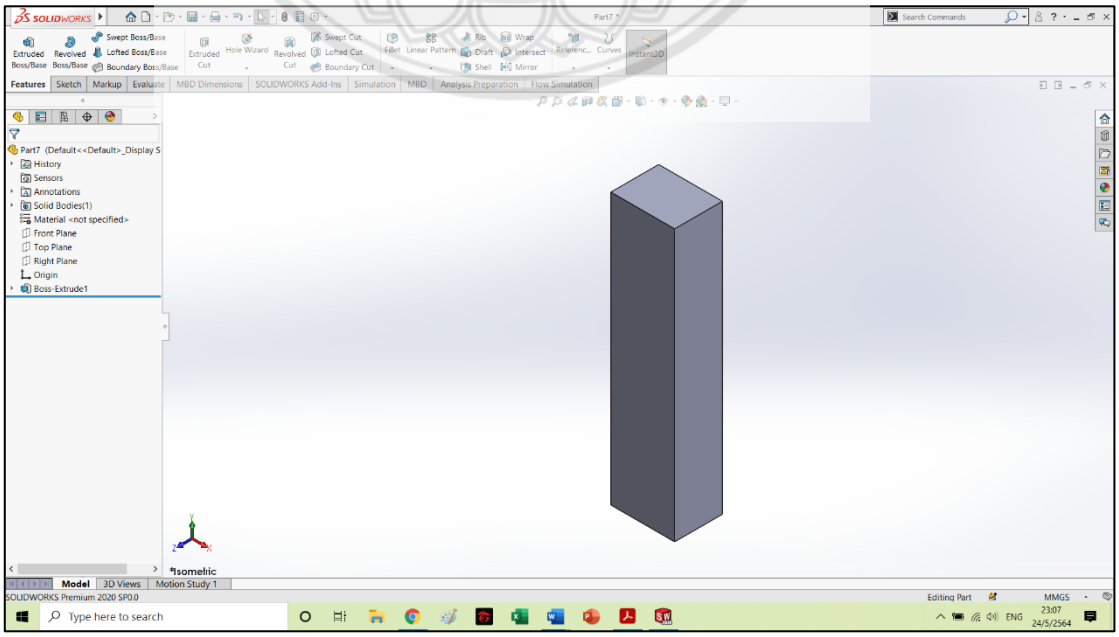
5.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

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

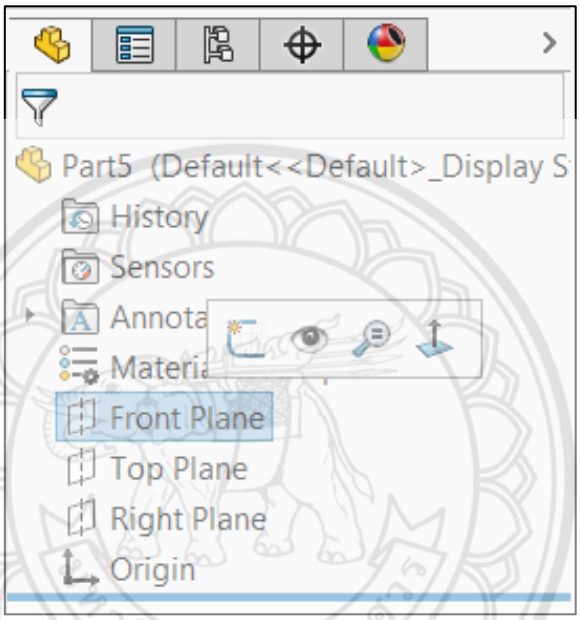


6. การสร้างภาคจ่ายไฟขนาดเล็ก 10 ชิ้น

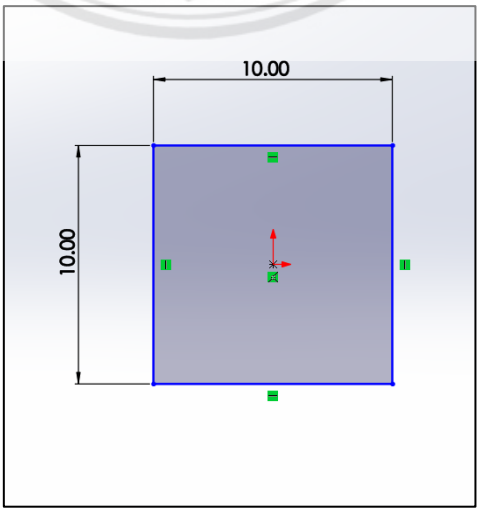
6.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

6.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

6.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



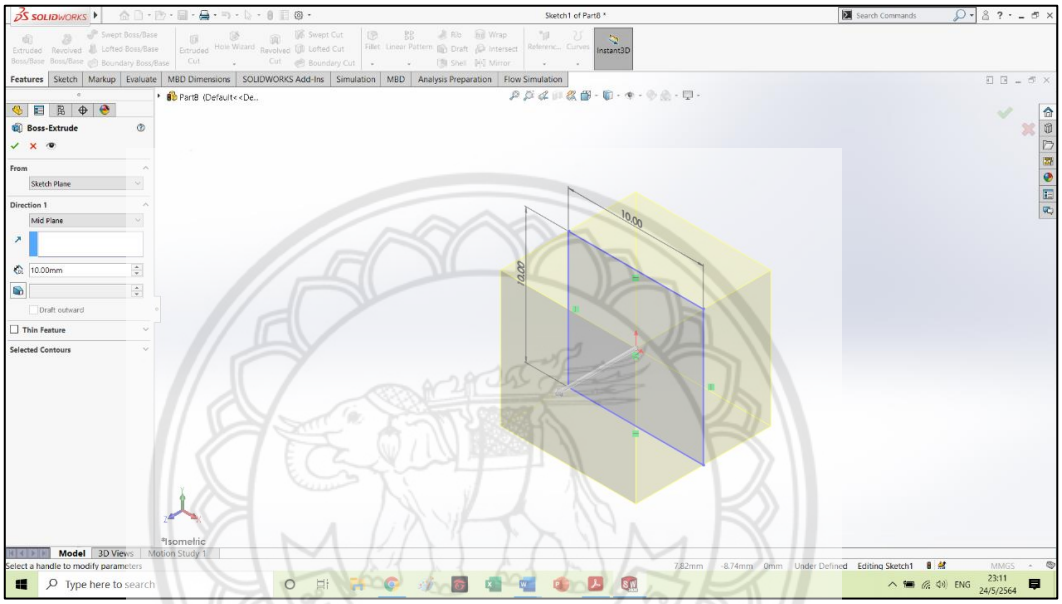
6.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 10 mm ยาว 10 mm



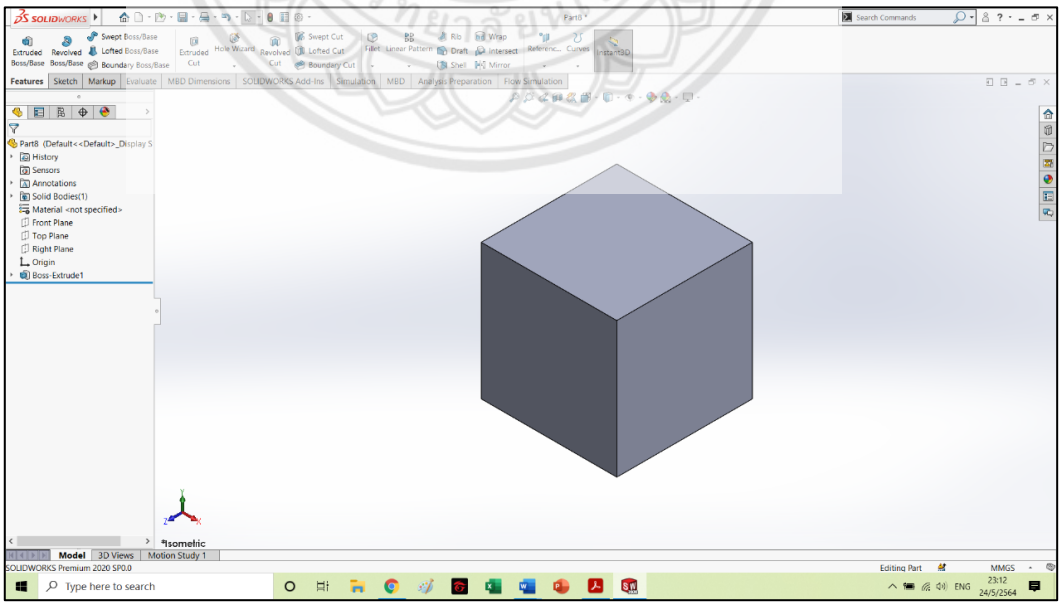
6.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

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

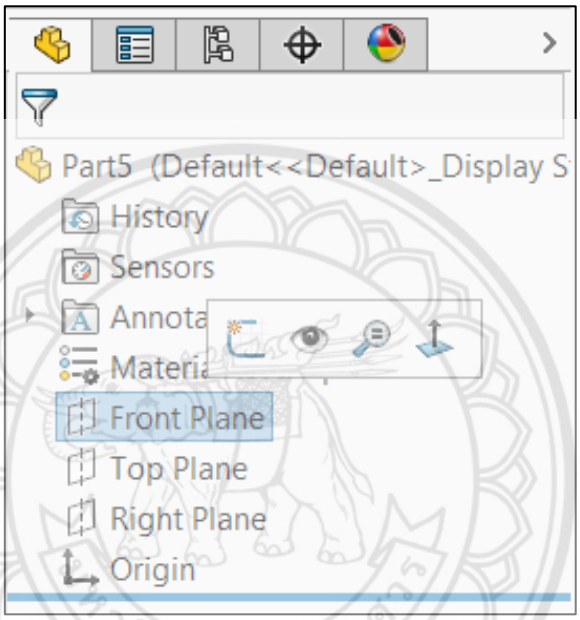


7. การสร้างภาคจ่ายไฟของการ์ดแสดงผล

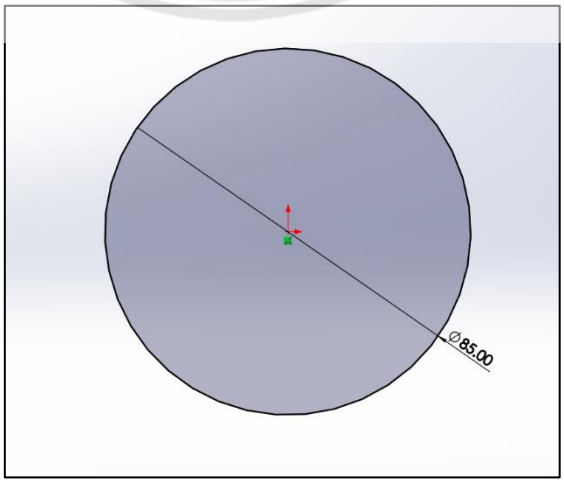
7.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

7.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

7.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



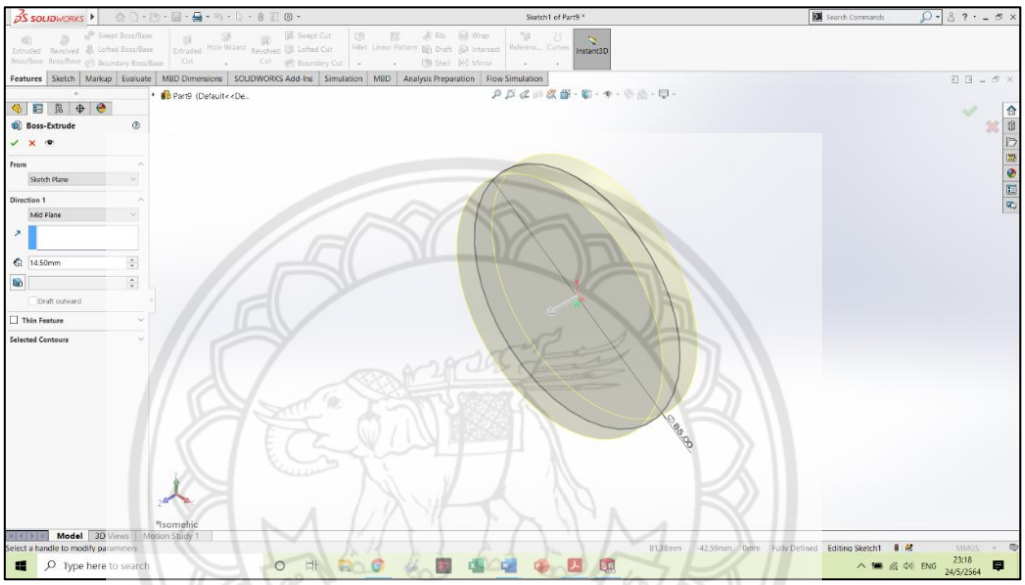
7.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟของการ์แสดงผล) 85 mm



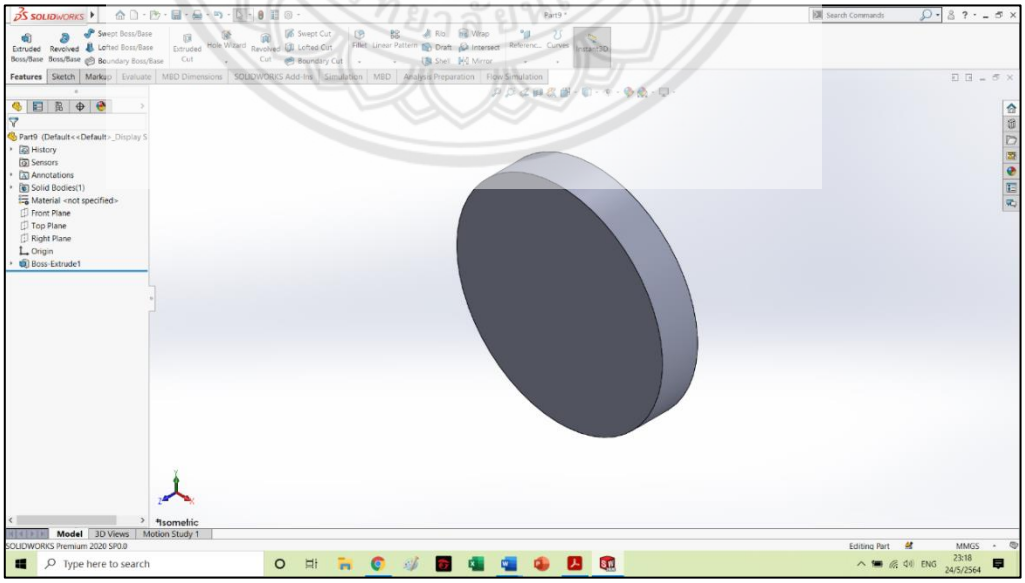
7.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

7.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

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



7.8 คลิก OK

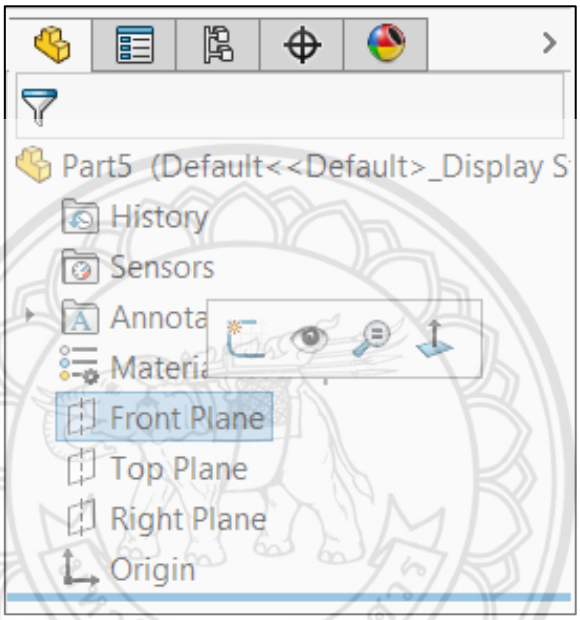


8. การสร้างแผ่น PCB ของการ์ดแสดงผล

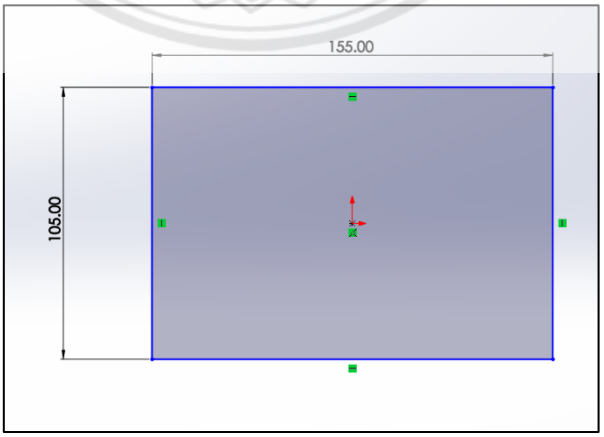
8.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

8.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

8.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



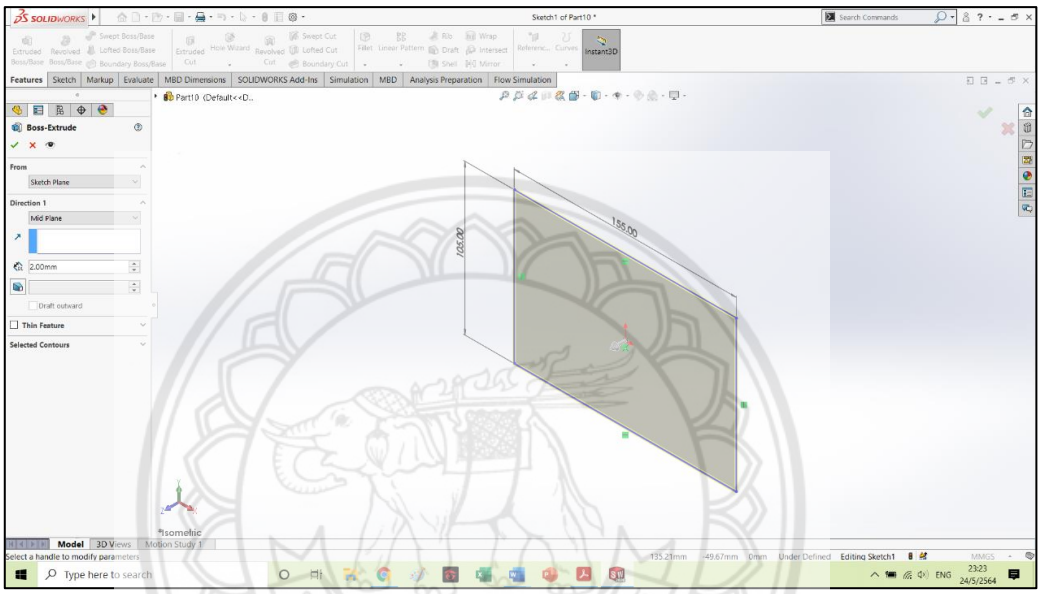
8.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 155 mm ยาว 105 mm



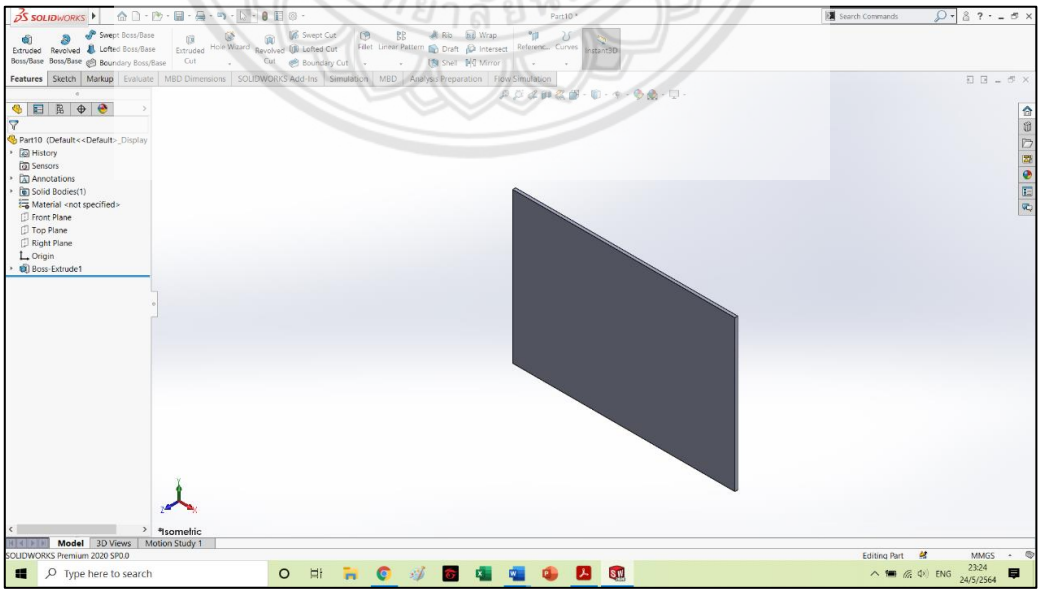
8.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

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

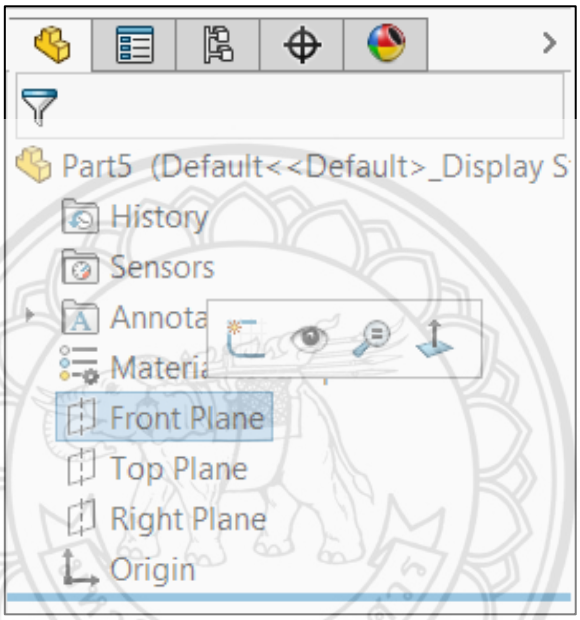


9. การสร้างก้อน Mesh Solid ในการวิเคราะห์

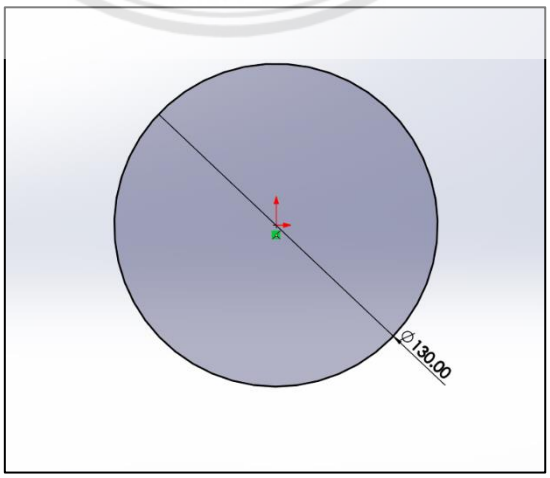
9.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

9.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

9.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



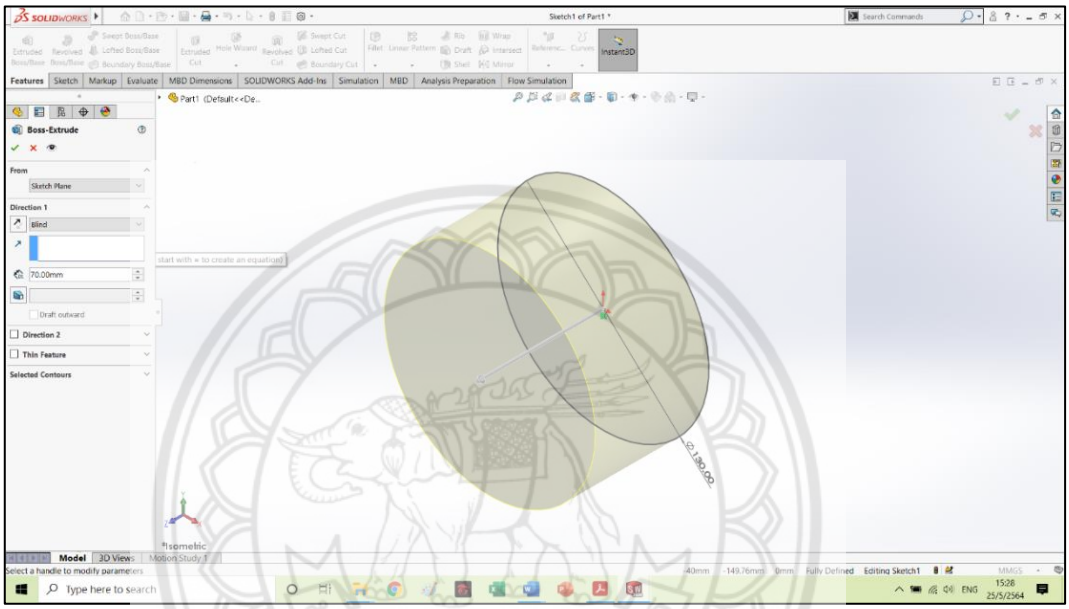
9.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อน Mesh Solid) 130 mm



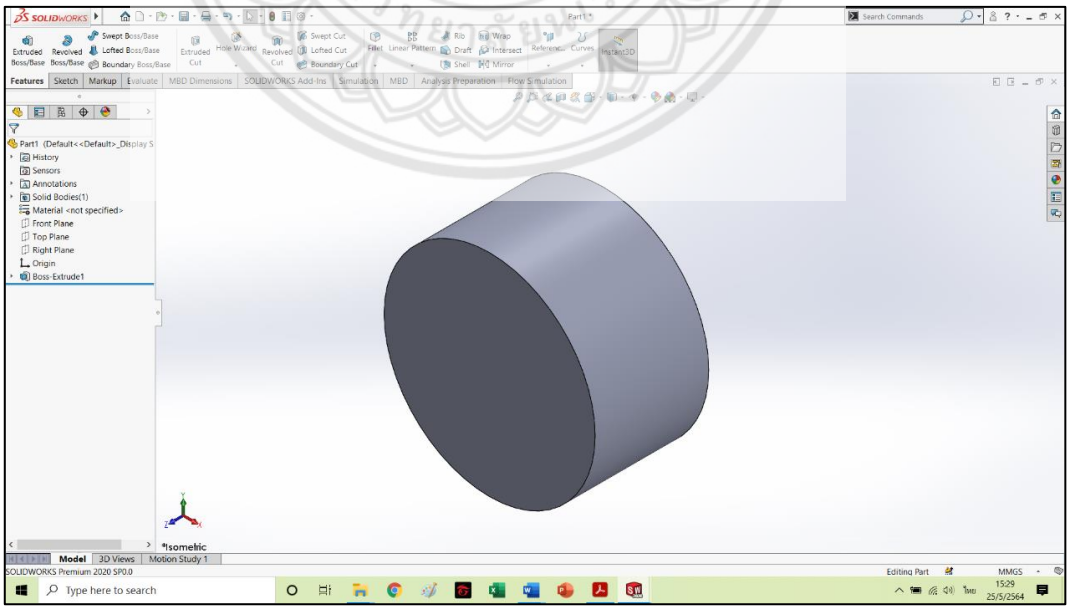
9.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

9.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

9.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Blind และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 70 mm



9.8 คลิก OK

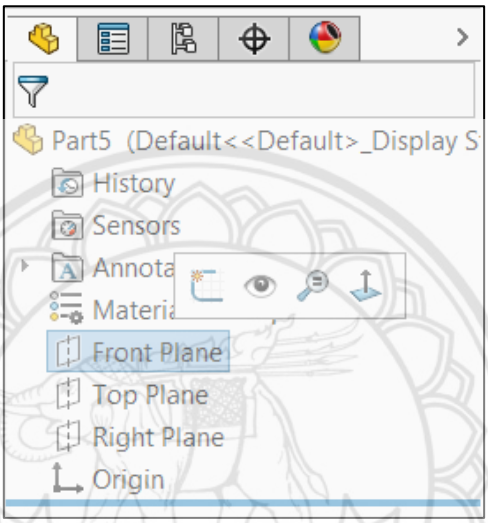


10. การสร้าง Chip GPU

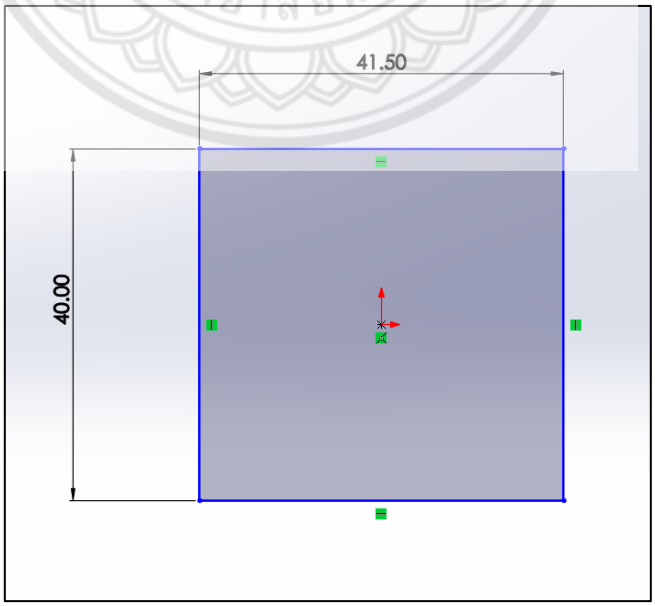
10.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

10.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

10.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



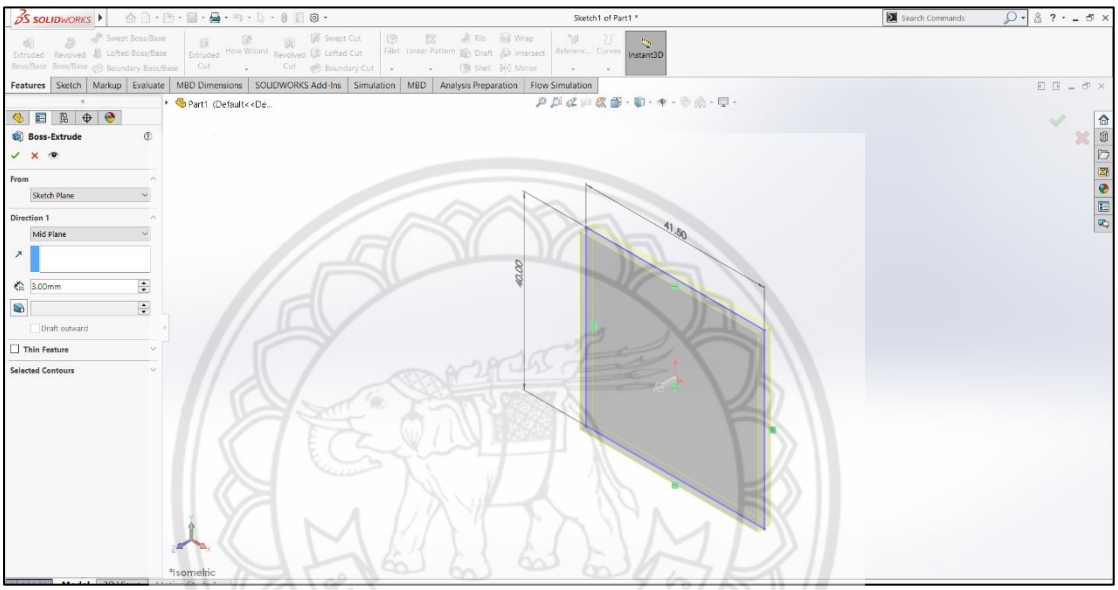
10.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 155 mm ยาว 105 mm



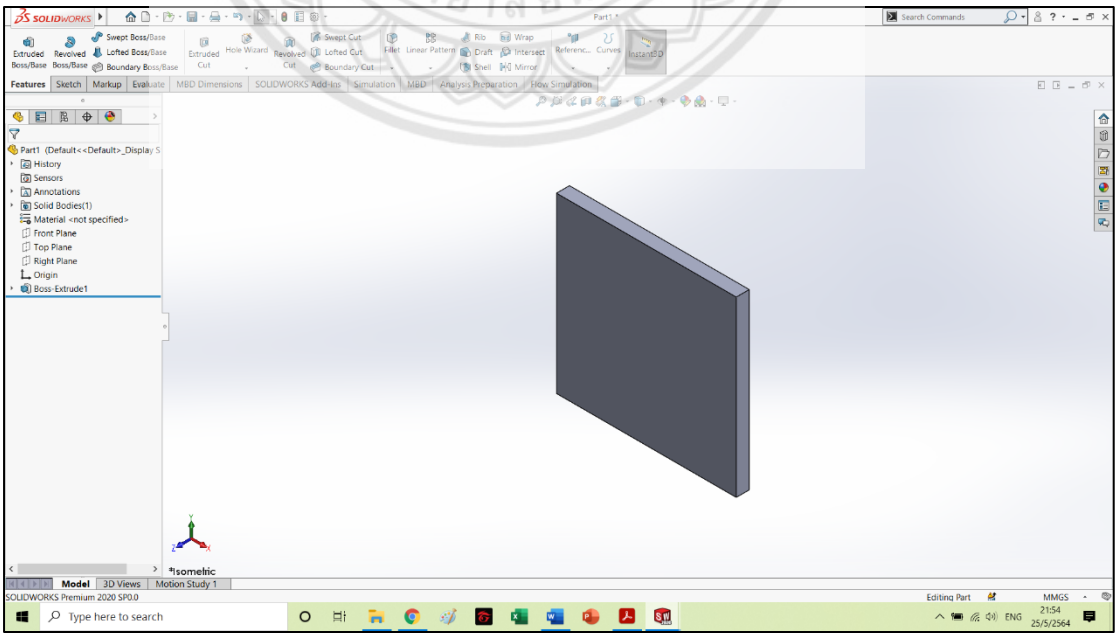
10.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

10.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

10.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 3 mm



10.8 คลิก OK

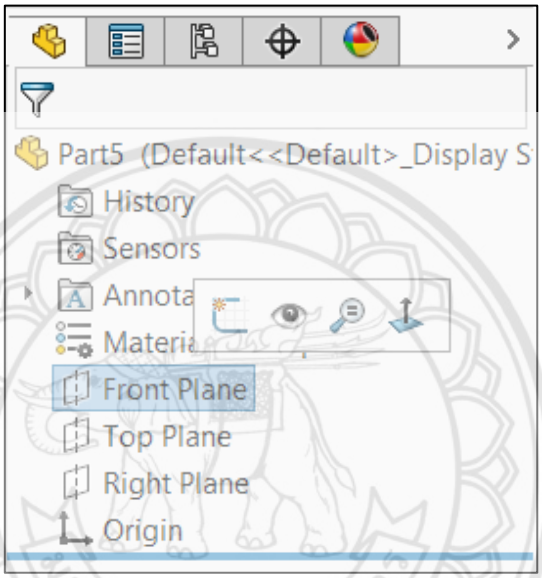


11. การสร้างพัดลม CPU

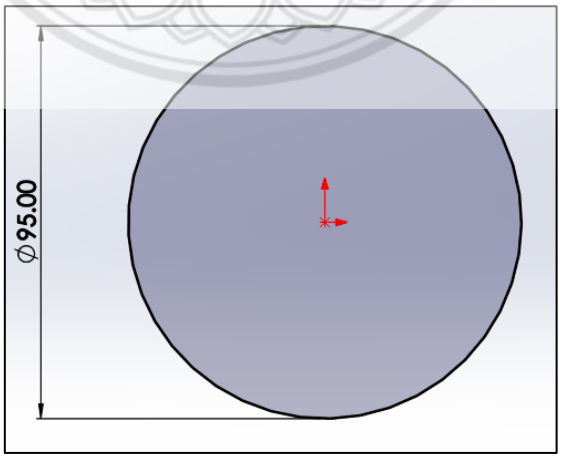
11.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

11.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

11.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



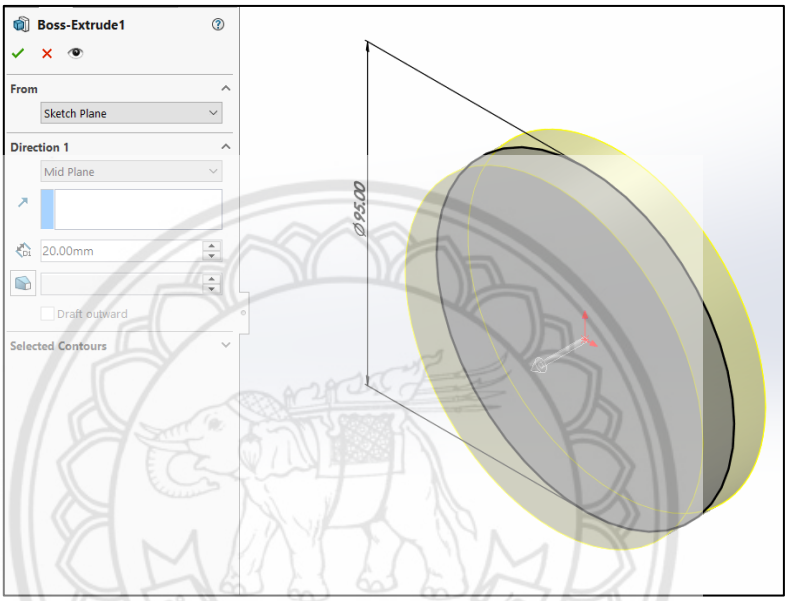
11.4 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 95 mm



11.5 กำหนดมุมมองเป็นแบบ Isometric

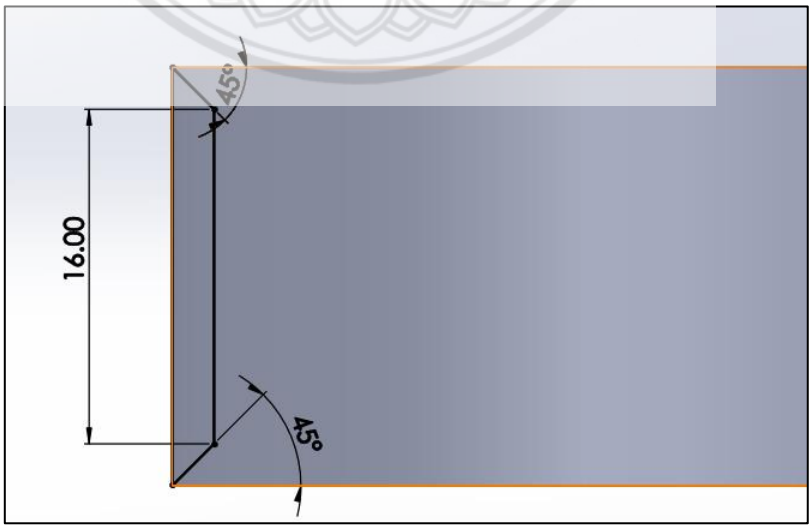
11.6 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

11.7 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 20 mm



11.8 คลิกซ้ายที่ระนาบ Top Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู

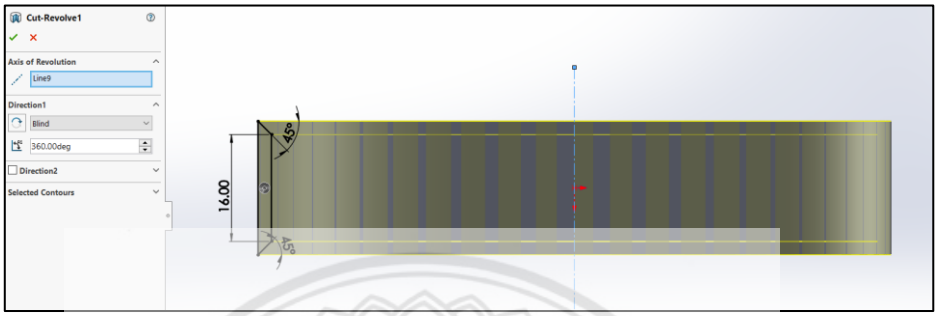
11.9 เลือกคำสั่ง line จากเมนู แล้วสร้างเส้นดังนี้

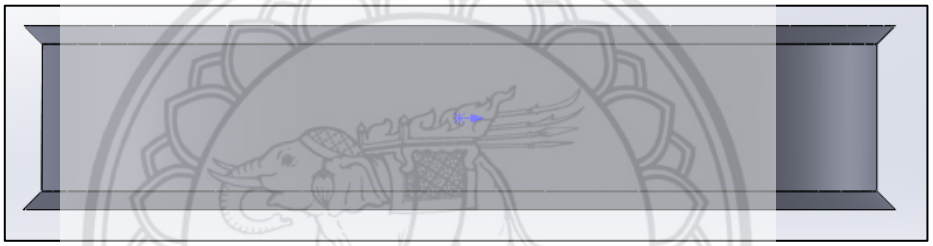


11.10 คลิก Features เลือกคำสั่ง Revolved cut

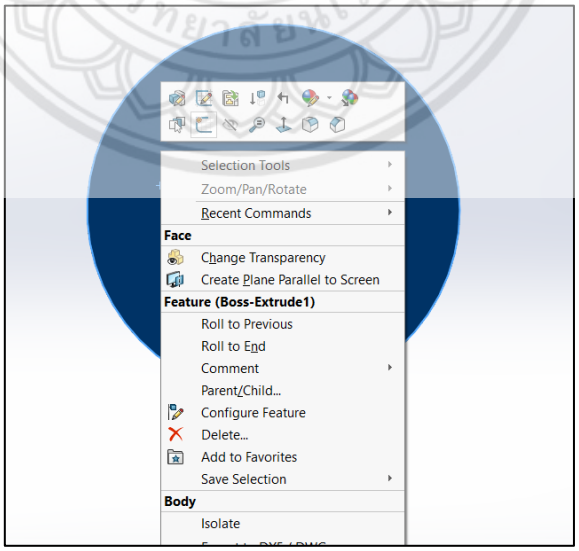
จากเมนู

11.11 เลือกกี่ Revolved cut เป็นแบบ Blind กำหนดให้หมุนรอบเส้น center line (Line 9) แล้วคลิก OK

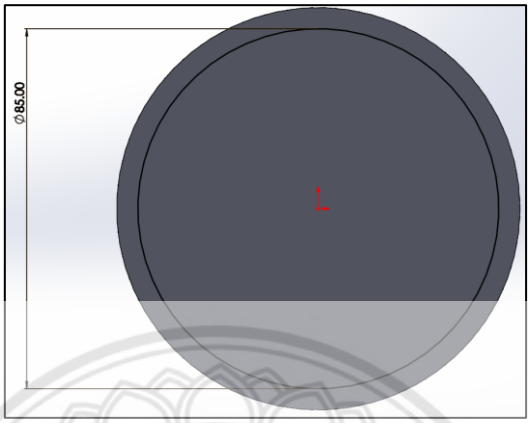




11.12 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



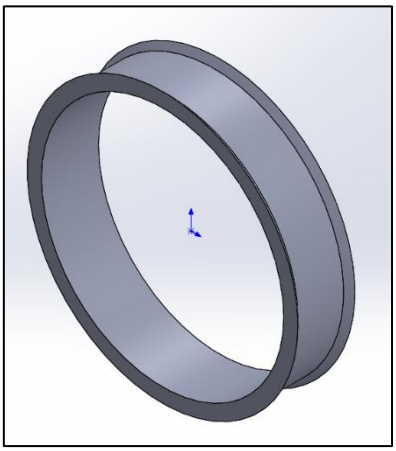
11.13 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 85 mm



11.14 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Cut

จากเมนู

11.15 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Through All แล้วคลิก OK

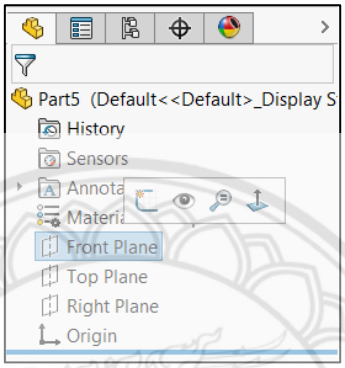


12. การสร้างพัดลมการ์ดแสดงผล

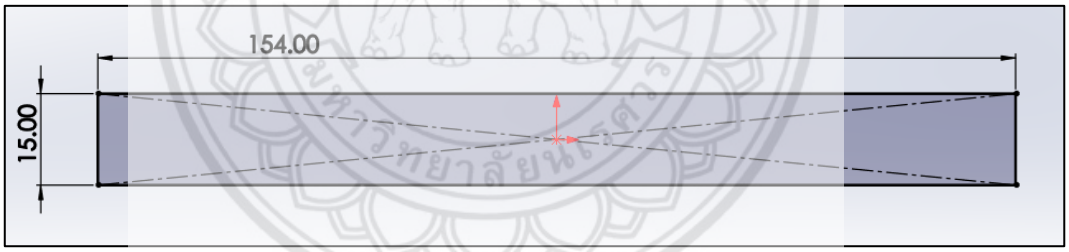
12.1 คลิก เพื่อทำการเริ่มสร้างชิ้นงาน

12.2 คลิกเลือก Part เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D

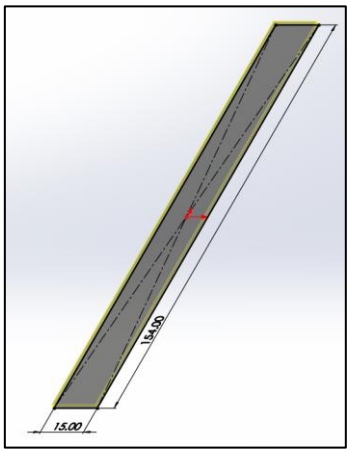
12.3 คลิกซ้ายที่ระนาบ Front Plane แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู



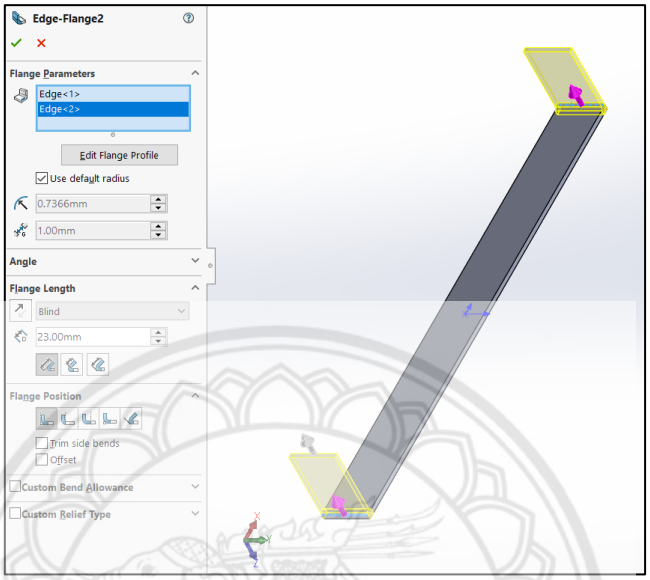
12.4 เลือกคำสั่ง Conner Rectangular จากเมนู สร้างสี่เหลี่ยม กว้าง 15 mm ยาว 154 mm



12.5 เลือกคำสั่ง Base Flange และกำหนด sheet Metal Parameters 1.50 mm

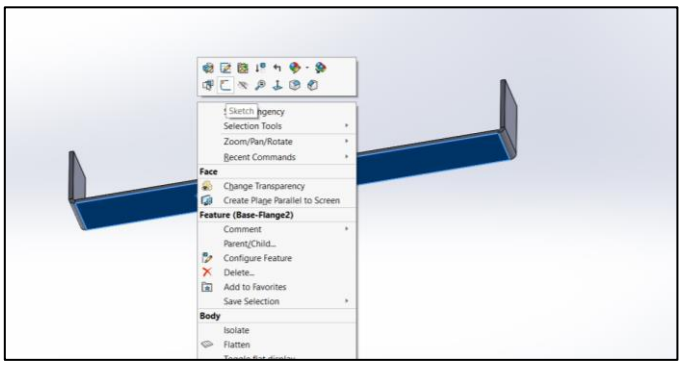


12.6 เลือกคำสั่ง Edge Flange เลือกที่มุนของ Part ทั้งสองด้าน Flange Length เป้นแบบ Blind และกำหนด 23 mm

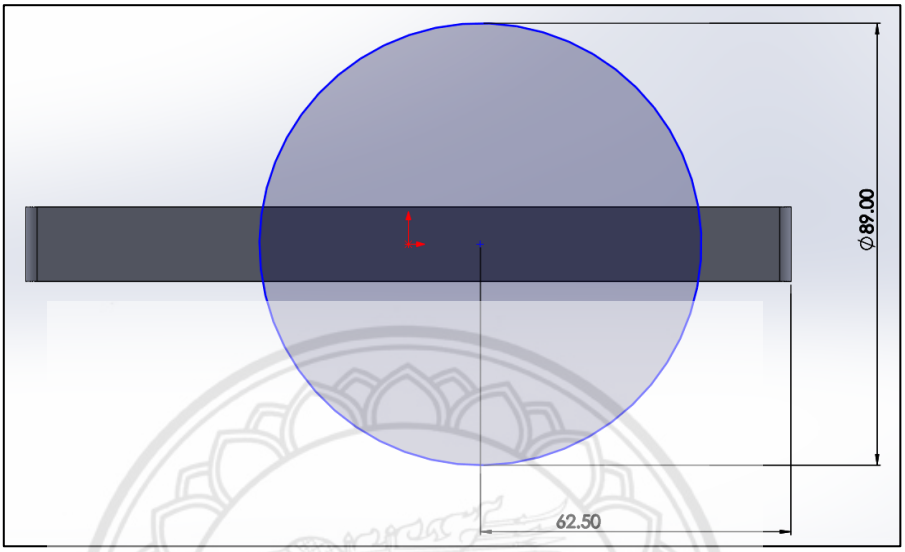


12.7 คลิก OK

12.8 คลิกซ้ายที่พื้นที่ด้านหลัง แล้วเลือก Insert Sketch จากเมนู

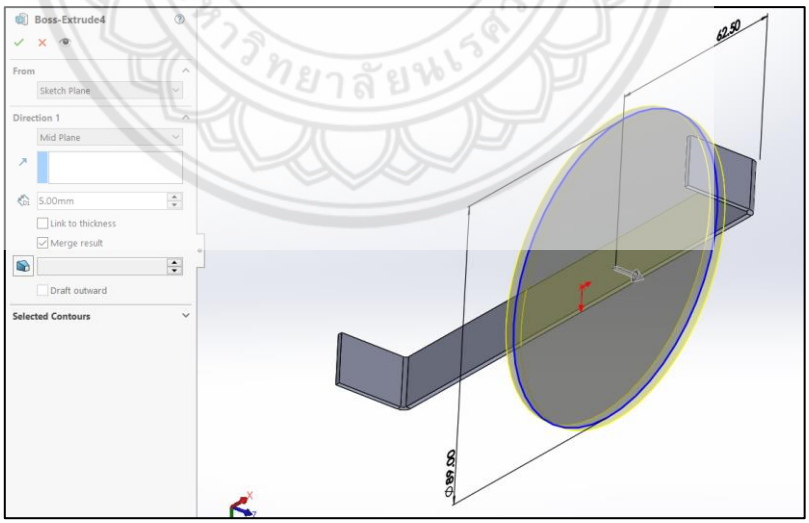


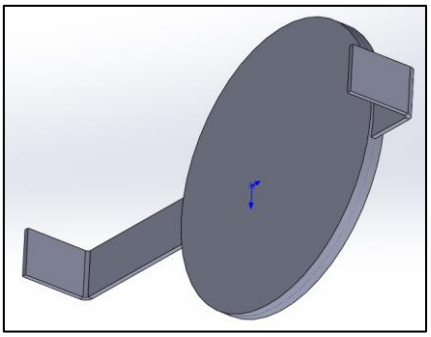
12.9 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 89 mm



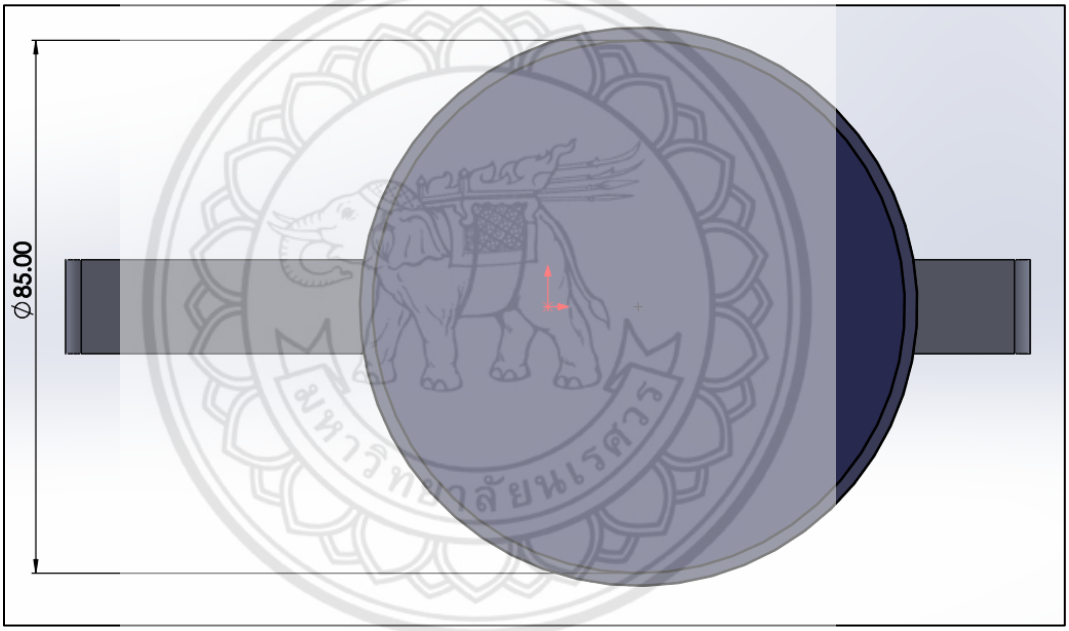
12.10 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base จากเมนู

12.11 เลือกการ Extruded เป็นแบบ Mid Plane และกำหนด Depth (ระยะของการ Extruded) 5.00 mm แล้วคลิก OK





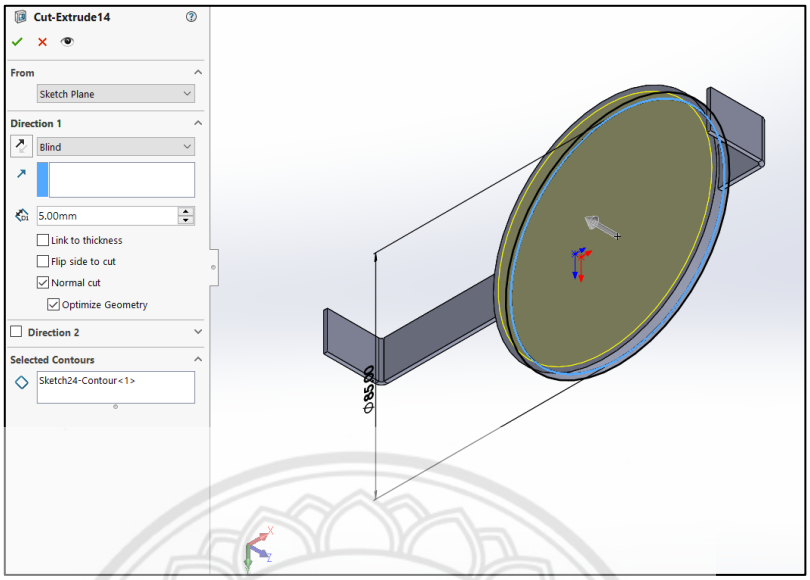
12.12 เลือกคำสั่ง Circle จากเมนู และกำหนด Depth (เส้นผ่านศูนย์กลางผ้าจ่ายไฟ) 85 mm



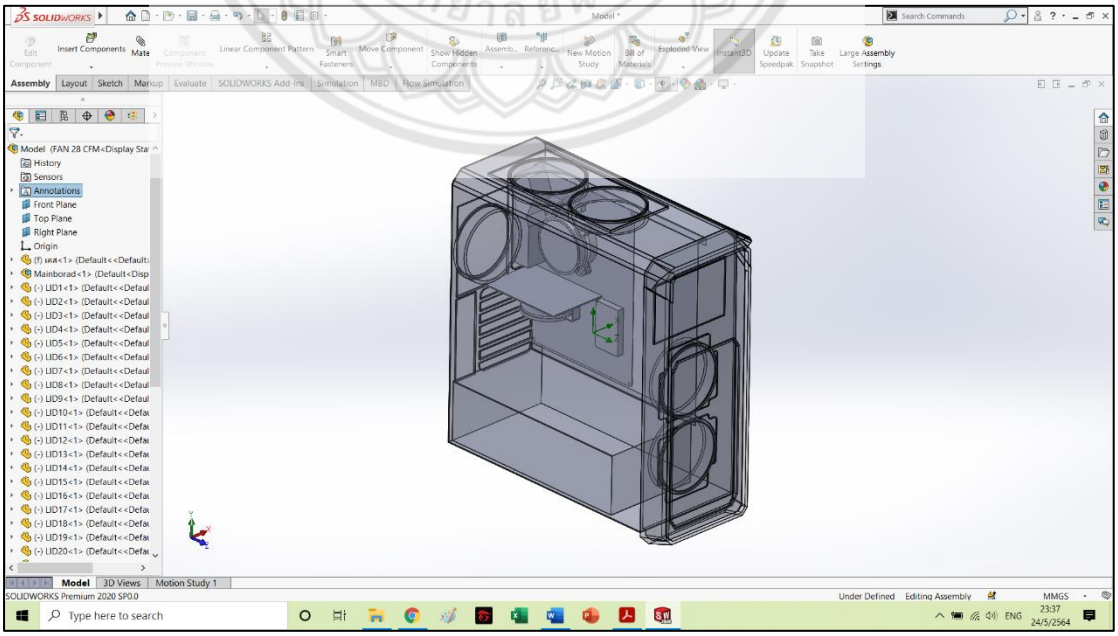
12.13 คลิก Features เลือกคำสั่ง Extruded Cut

จากเมนู

12.14 เลือกการ Extruded cut เป็นแบบ Through All แล้วคลิก OK



สร้างแบบจำลองโดยประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน

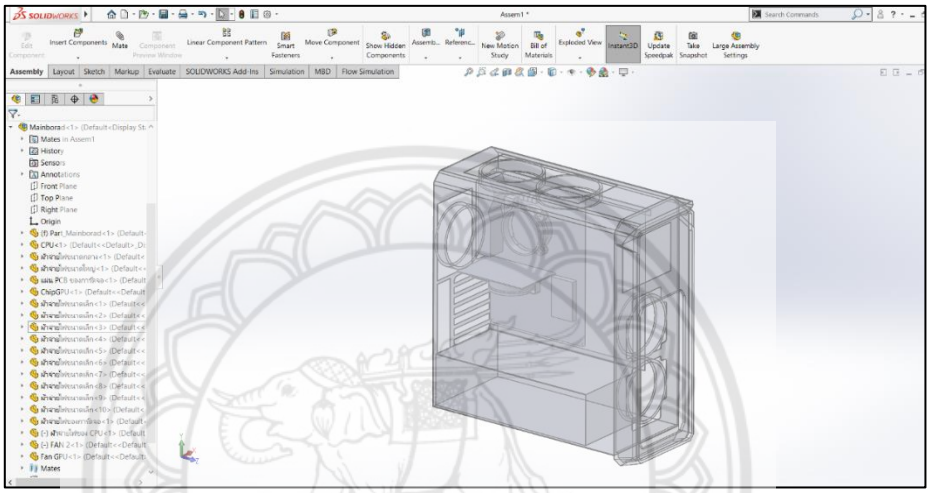


ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

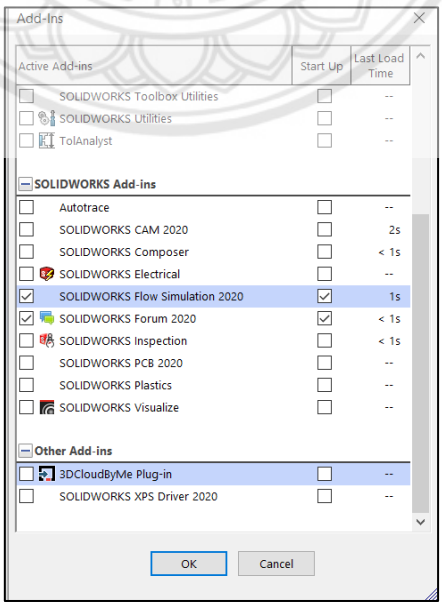
วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. เตรียมแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.1 เปิดไฟล์แบบจำลองขึ้นมา



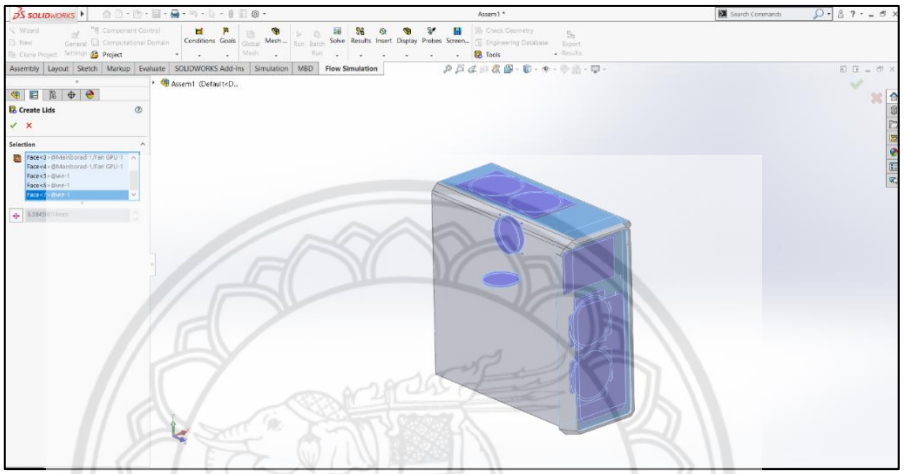
1.2 คลิกซ้ายที่ลูกศรด้านขวามือของเฟือง จากนั้นเลือกคำสั่ง Add in Add-Ins... จะแสดงแถบ Tool Bar ชื่อว่า Add - Ins ขึ้นมา ให้เลือกเช็คถูกทั้งด้านหน้าและด้านหลังของ Solidworks Flow Simulation 2020 จากนั้นกด OK



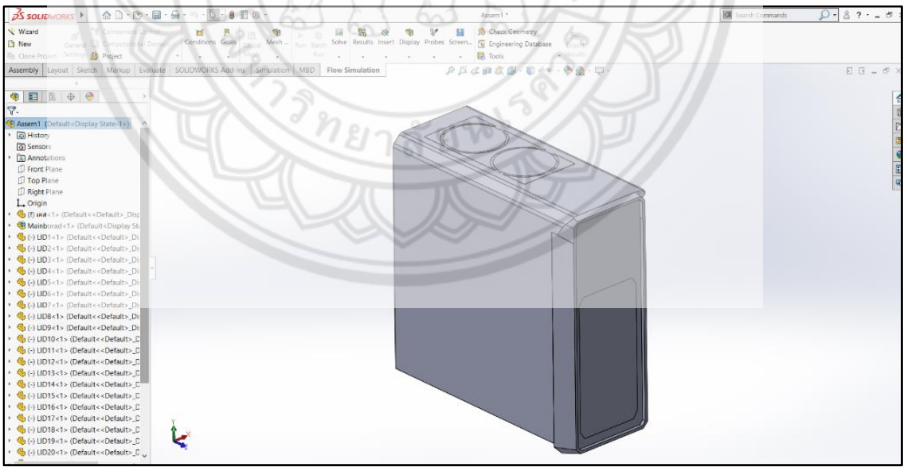
2. สร้าง Lids ที่ช่องที่ของไหลสามารถไหลผ่านได้

2.1 คลิก Flow Simulation เลือกคำสั่ง Create lids เพื่อปิดทางเข้าและออกของของไหลทั้งหมด

2.2 เลือกพื้นที่ที่เป็นทางเข้าและออกของของไหล



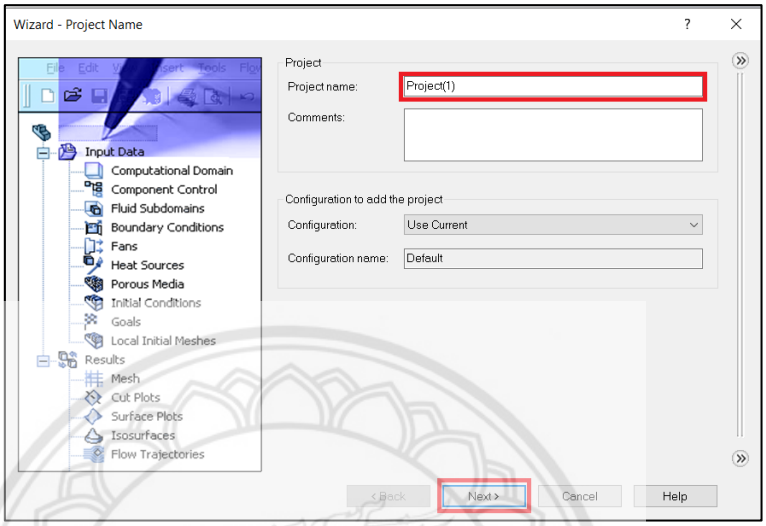
2.3 คลิก OK



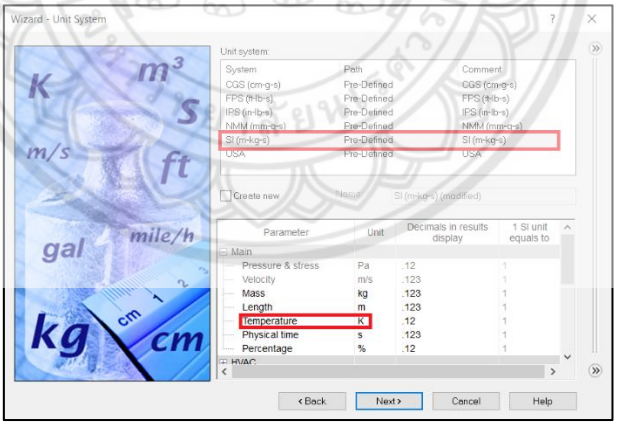
3. กำหนดคุณสมบัติของของไหลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 เลือกคำสั่ง Wizard

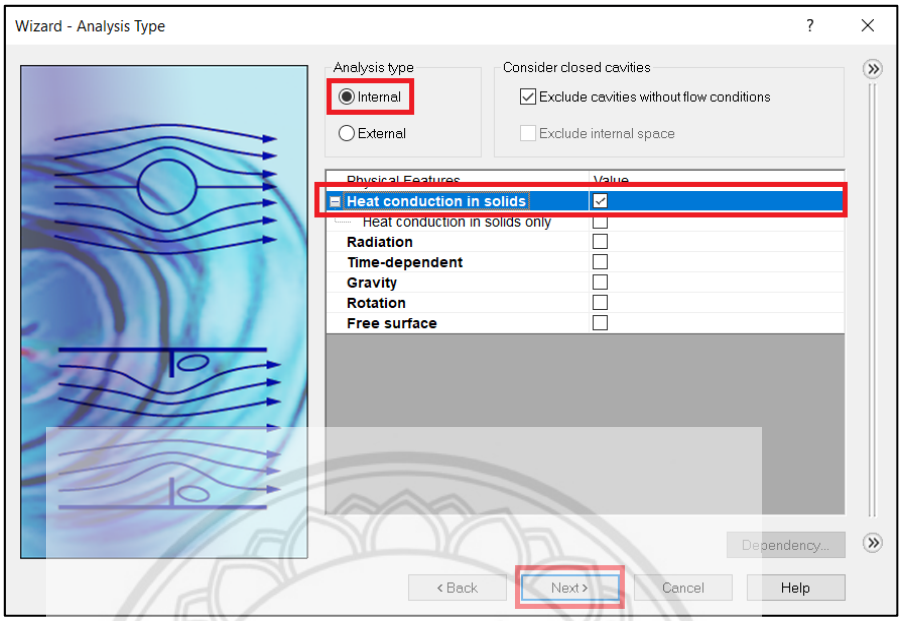
3.2 จะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Project Name ขึ้นมา จากนั้นให้ทำการตั้งชื่อ Project แล้วคลิก Next



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

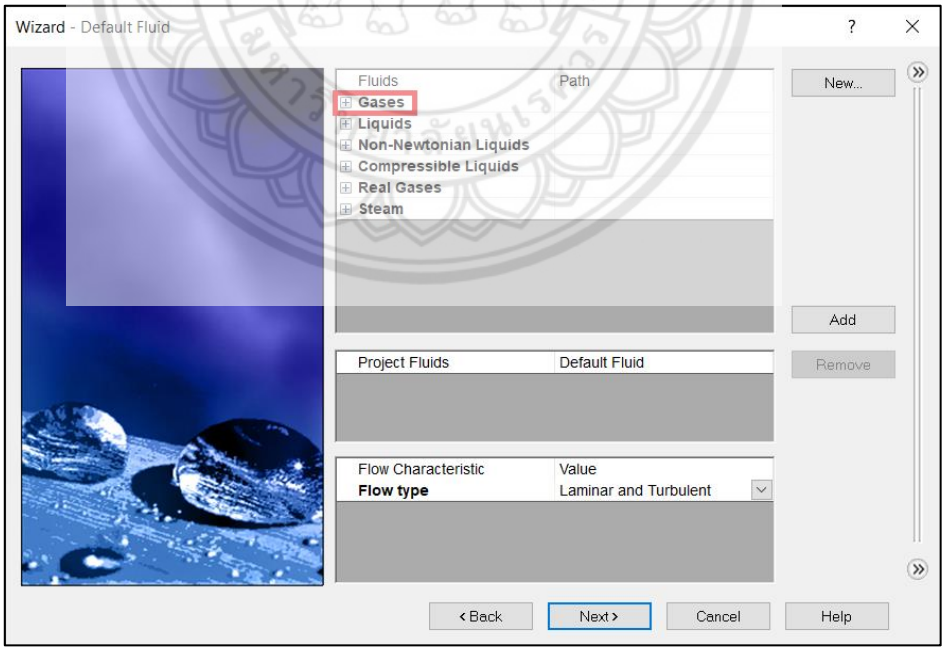


3.4 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Analysis Type ขึ้นมา ให้เลือกรูปแบบการไหลเป็นแบบการไหลภายใน Internal และการคำนวณให้เลือก Heat conduction in solids แล้วคลิก Next

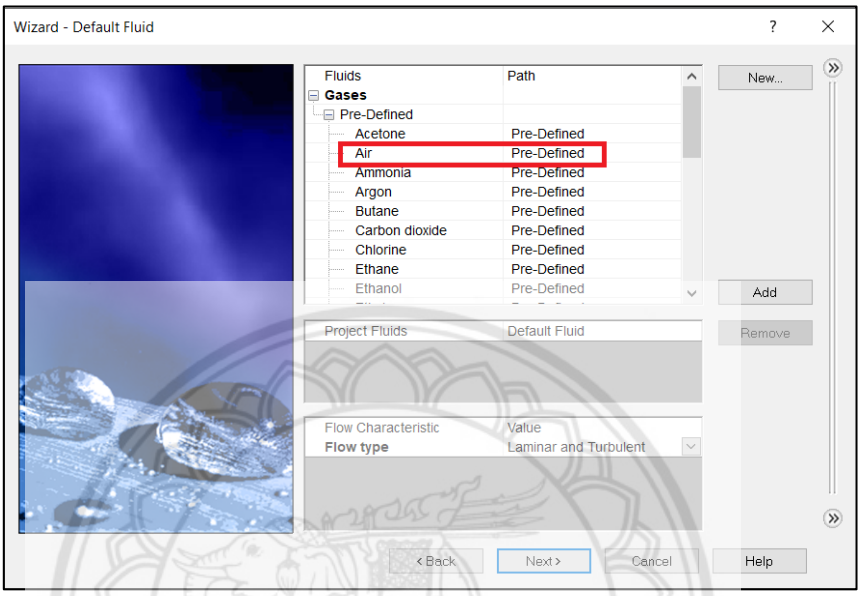


3.5 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Default Fluid ขึ้นมา กำหนดชนิดของของไหล (ในกรณีศึกษานี้ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน)

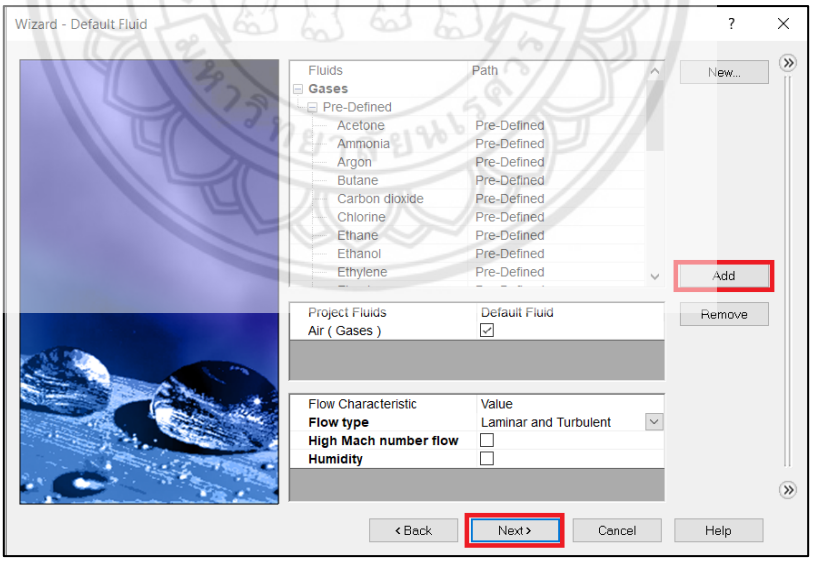
3.5.1 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Gases



3.5.2 เลือก Air

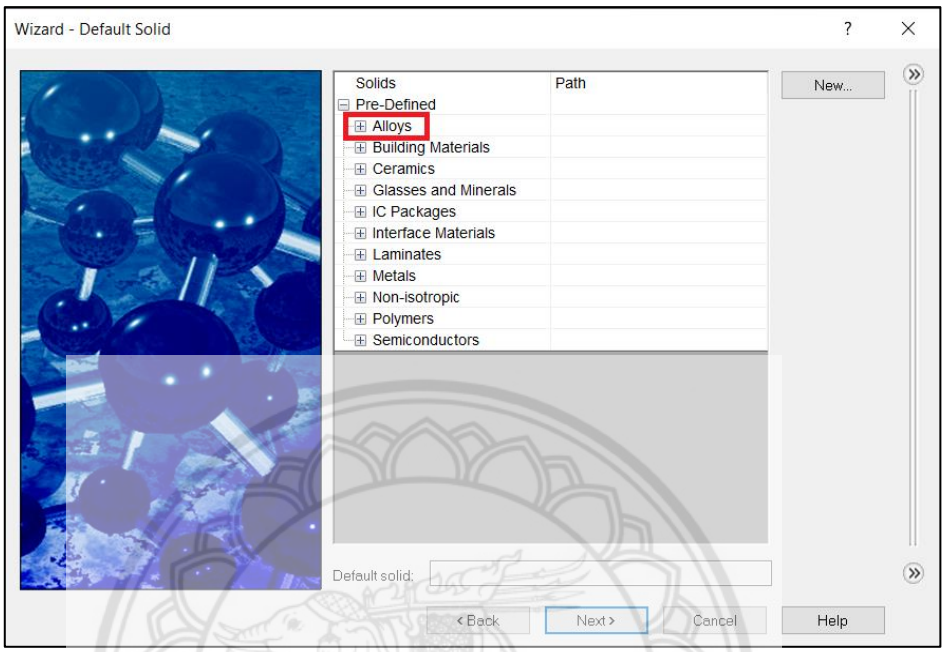


3.5.3 คลิก Add แล้วคลิก Next

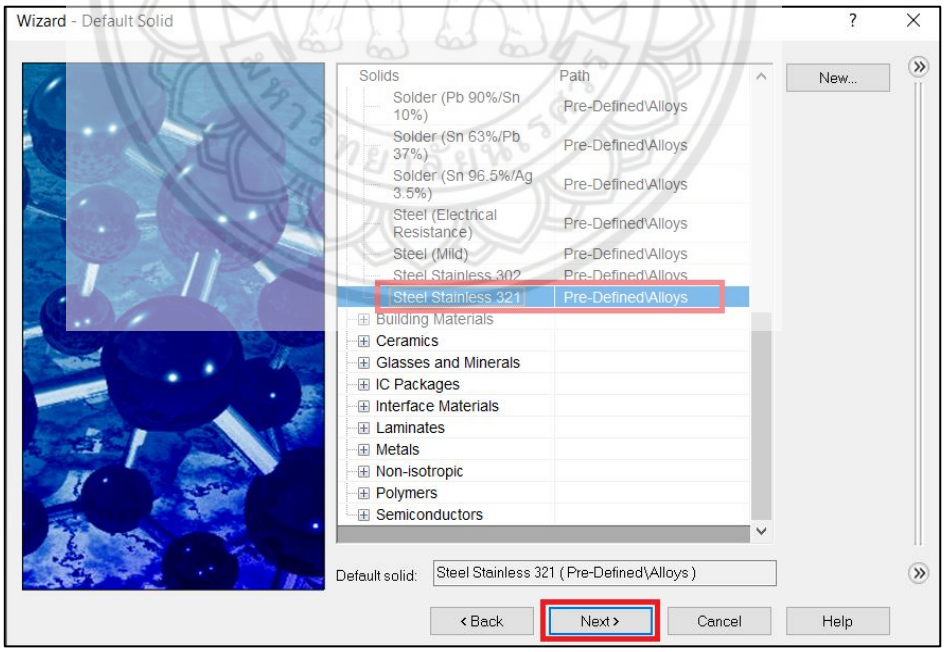


3.6 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Default Solid ขึ้นมา กำหนด Material ของแบบจำลอง (ในกรณีศึกษานี้ใช้ Steel Stainless 321)

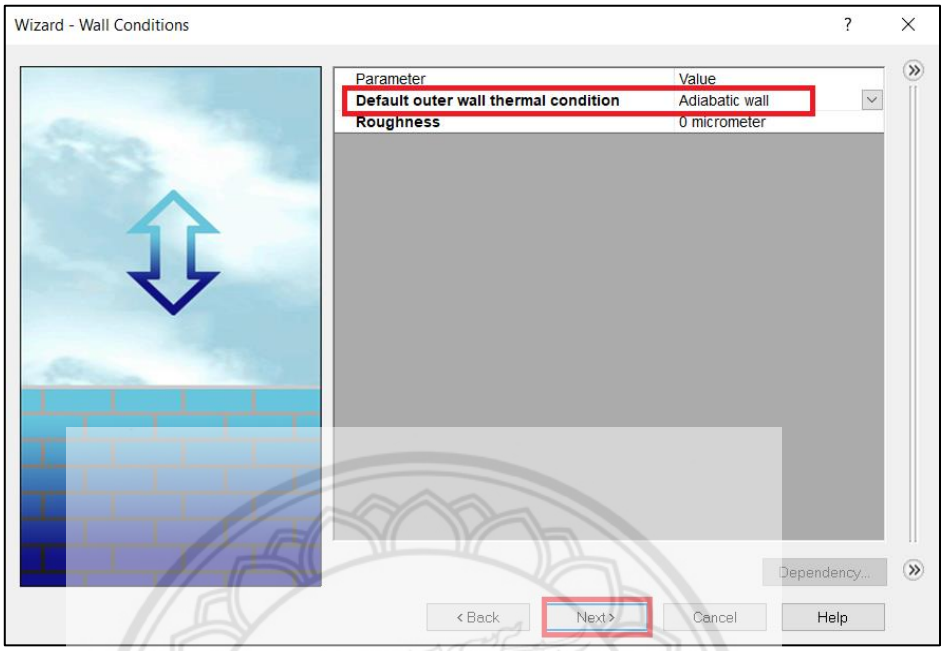
3.6.1 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Alloys



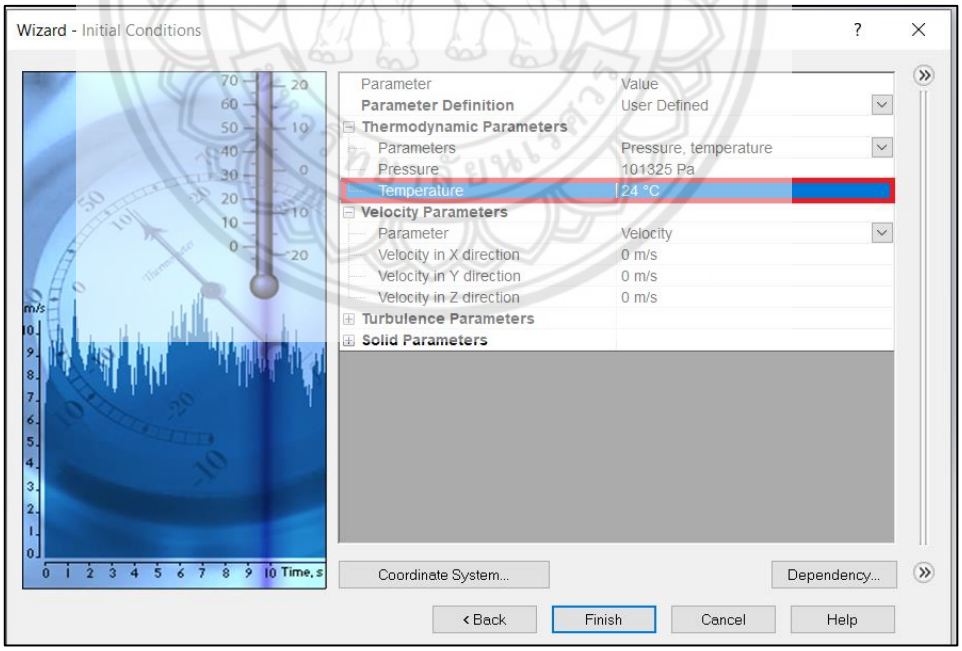
3.6.2 เลือก Steel Stainless 321 แล้วคลิก Next



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

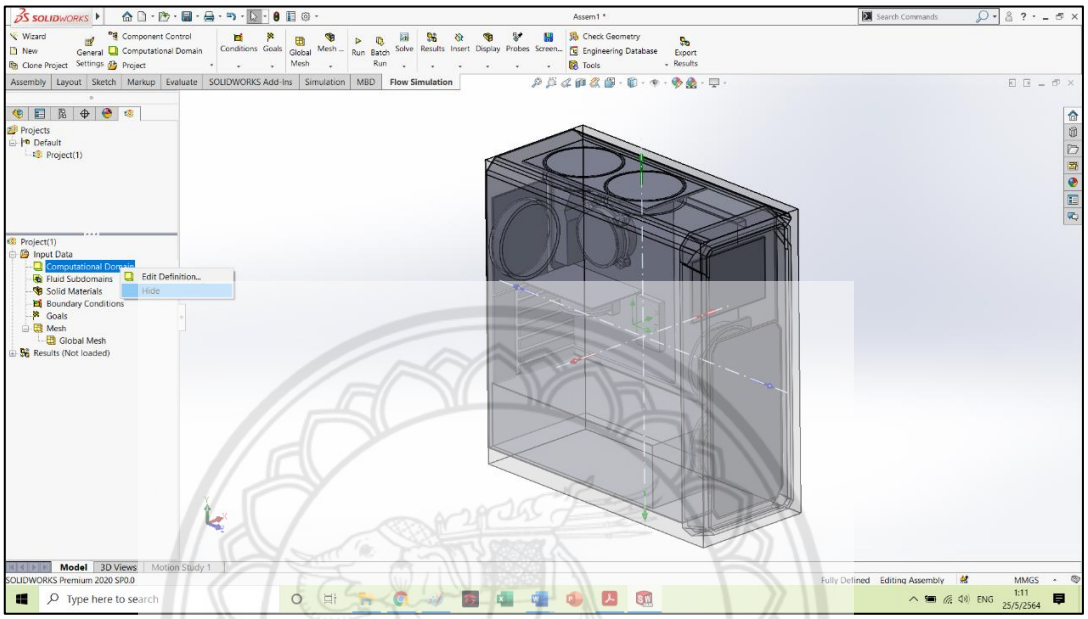


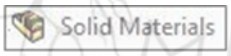
3.8 จากนั้นจะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Wizard – Initial Conditions ขึ้นมา กำหนดอุณหภูมิภายนอก (เปลี่ยนจาก 20 °C เป็น 24 °C) แล้วคลิก Finish

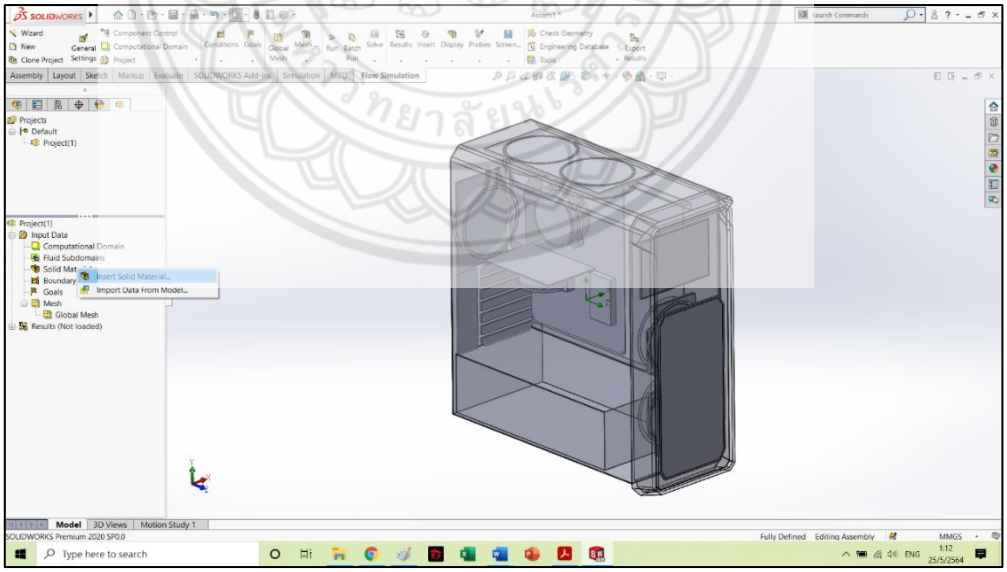


4. กำหนด Material ให้แก่ชิ้นส่วนที่เกิดความร้อน

4.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Computational Domain เลือก Hide

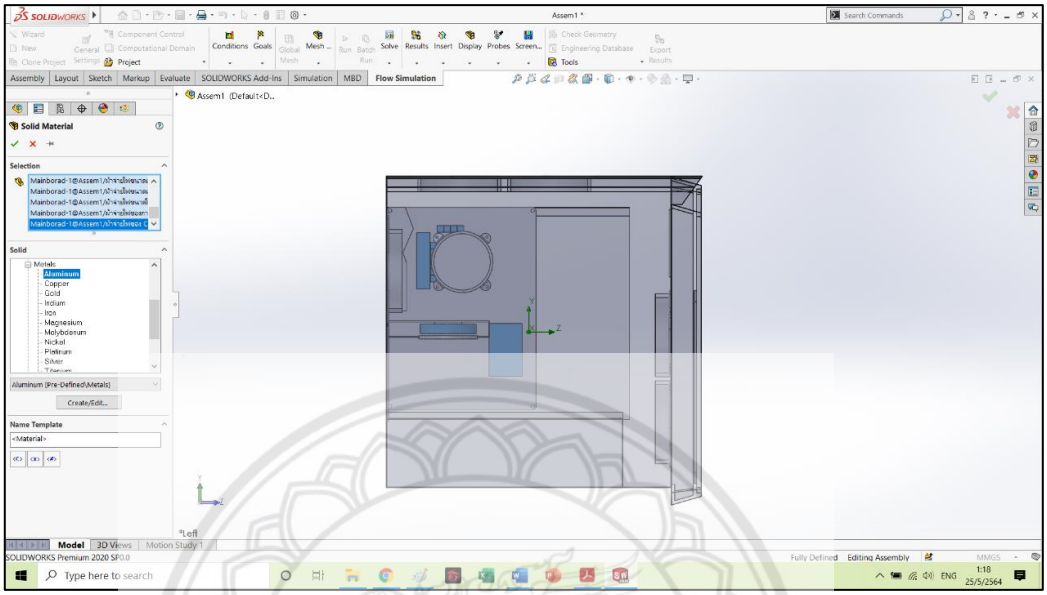


4.2 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material  เลือก Insert Solid Material



4.3 คลิกเลือกภาคจ่ายไฟทั้งหมด (ภาคจ่ายไฟของ CPU 1 ชิ้น ภาคจ่ายไฟของการ์ดแสดงผล 1 ชิ้น ภาคจ่ายไฟขนาดเล็ก 10 ชิ้น ภาคจ่ายไฟขนาดกลาง 1 ชิ้น และภาคจ่ายไฟขนาดใหญ่ 1 ชิ้น)

4.4 เลือก Material (ในกรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น Aluminum)



4.5 คลิก OK

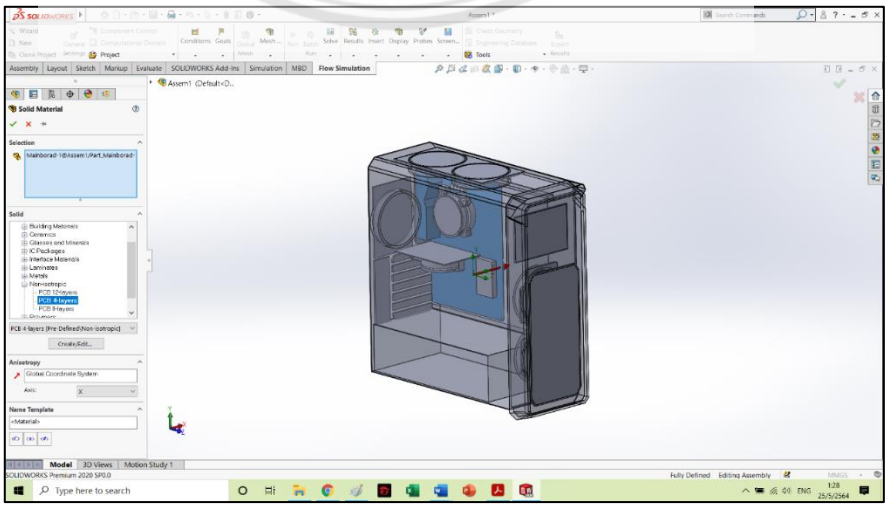
4.6 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material

เลือก Insert Solid Material

4.7 คลิกเลือกแผ่นบอร์ดทั้งหมด (แผ่นบอร์ดของ CPU 1 ชิ้น และแผ่นบอร์ดของการ์ดแสดงผล 1 ชิ้น)

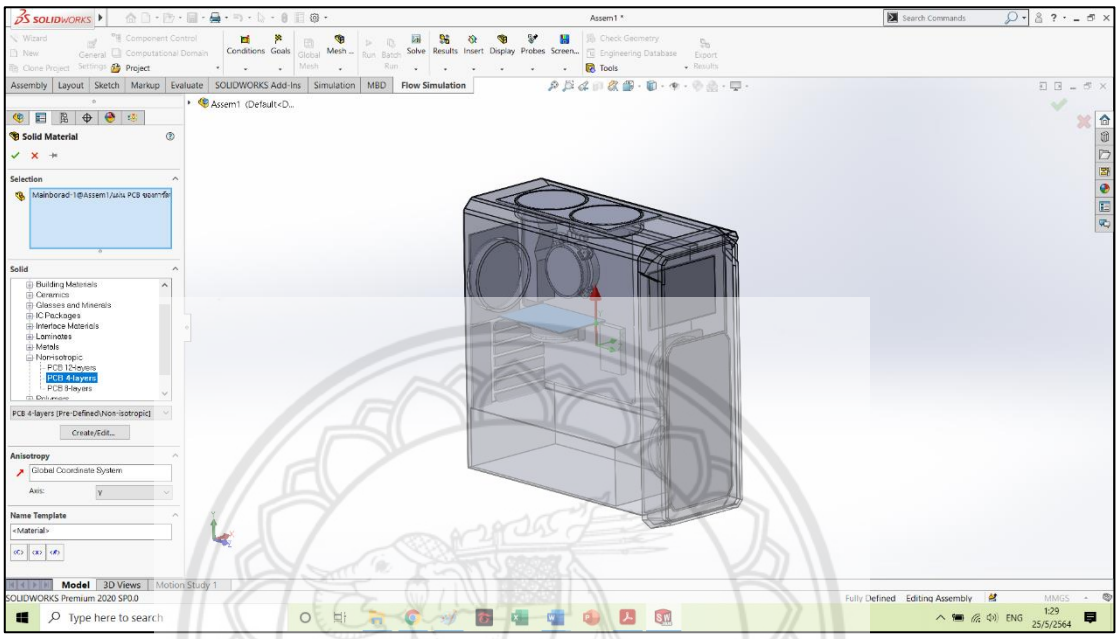
4.8 เลือก Material (ในกรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น PCB – 4 layer)

4.9 แผ่นบอร์ดของ CPU



4.10 คลิก OK

4.11 แผ่นบอร์ดของการ์ดแสดงผล



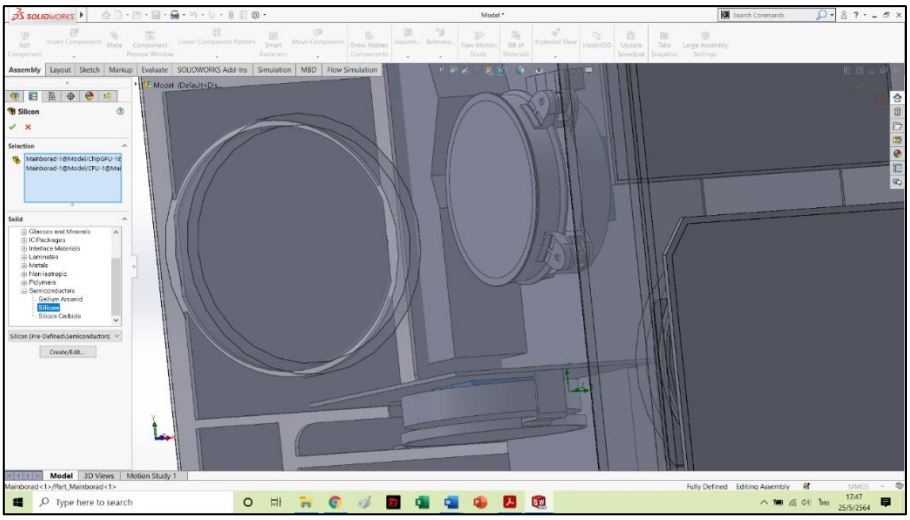
4.12 คลิก OK

4.13 คลิกขวาที่คำสั่ง Solid Material

เลือก Insert Solid Material

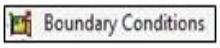
4.14 คลิกเลือก CPU และ Chip GPU ทั้งหมด (ชิ้นส่วนของ CPU 1 ชิ้น และ Chip GPU 1 ชิ้น)

4.15 เลือก Material (ในกรณีศึกษานี้กำหนด Material เป็น Silicon)

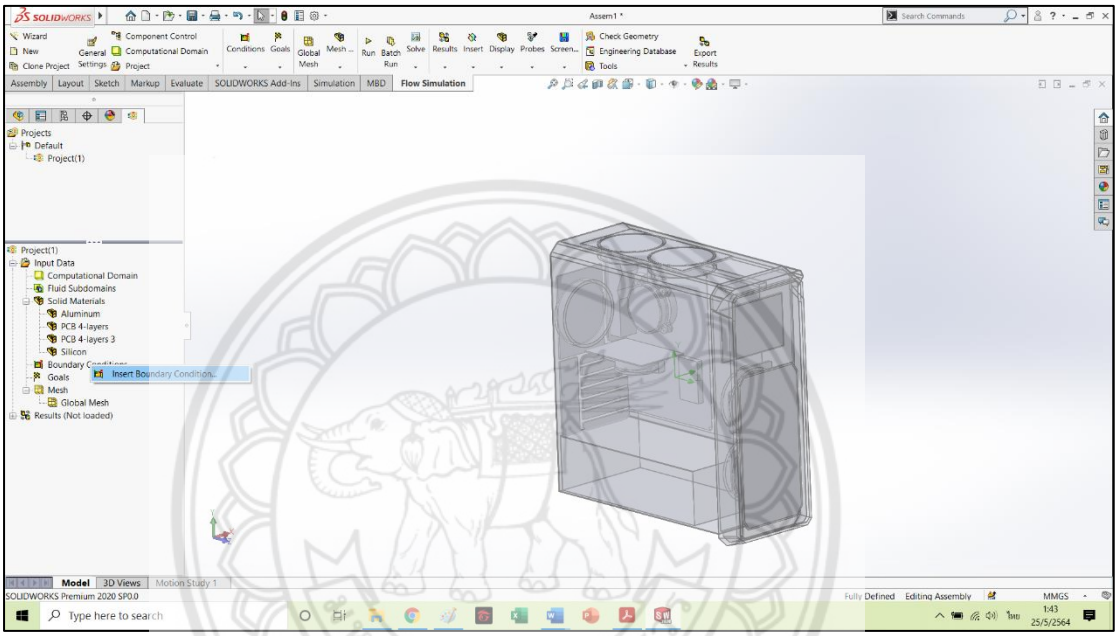


4.16 คลิก OK

5. กำหนดช่องของของไหลไหลผ่านอิสระ

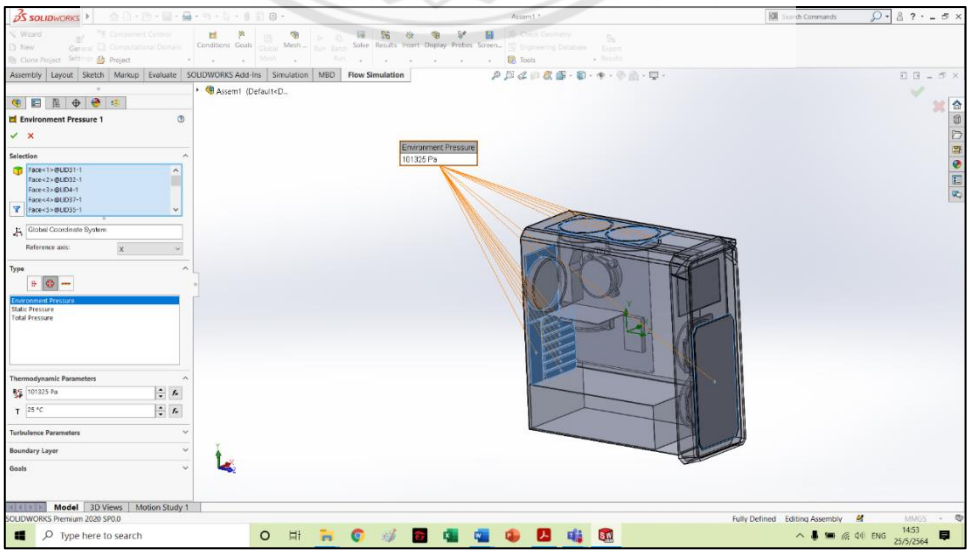
5.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Boundary Conditions 

เลือก Insert Boundary Condition

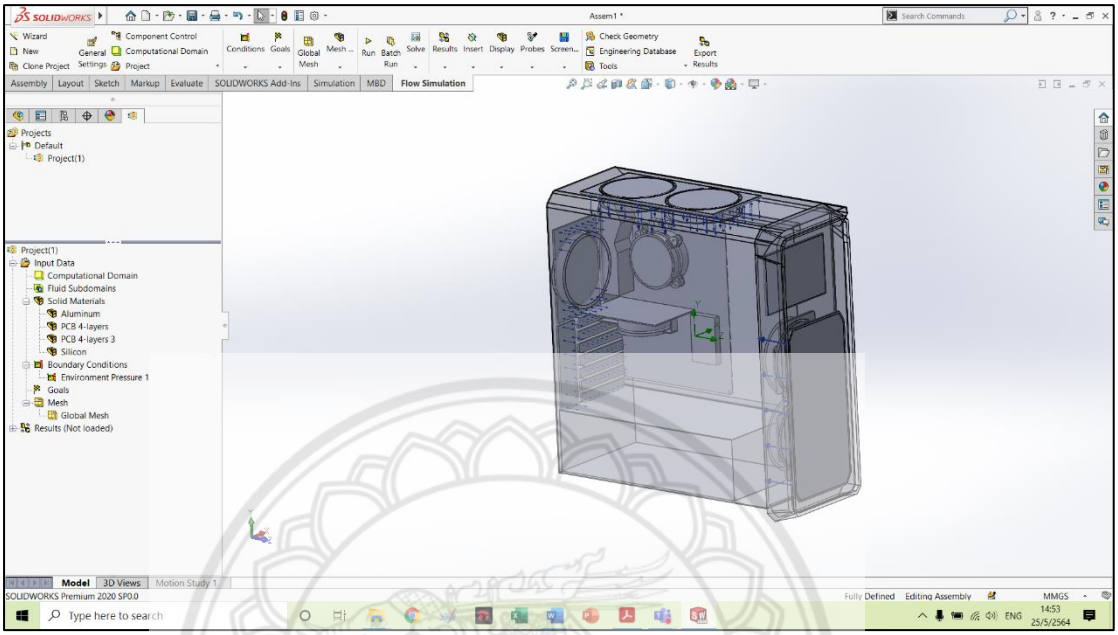


5.2 คลิกเลือกคำสั่ง Pressure Openings

5.3 คลิกเลือก Lids ที่เป็นช่องว่างของของไหลทั้งหมด ให้ทำการคลิกบริเวณภายในของ Lids



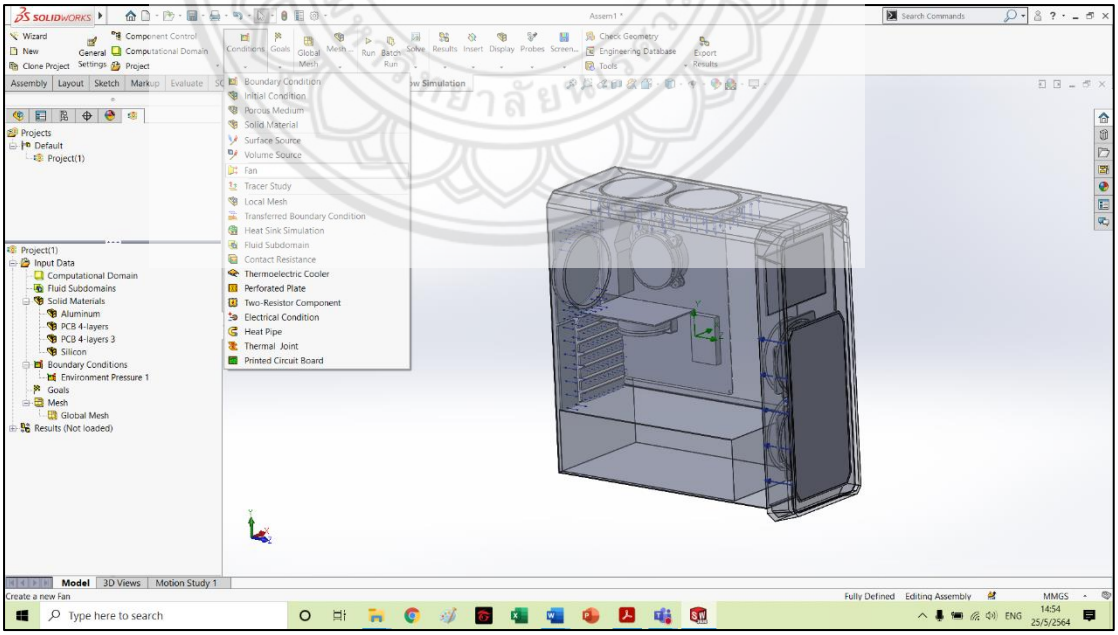
5.4 คลิก OK



6. การกำหนดพัดลมระบายความร้อน

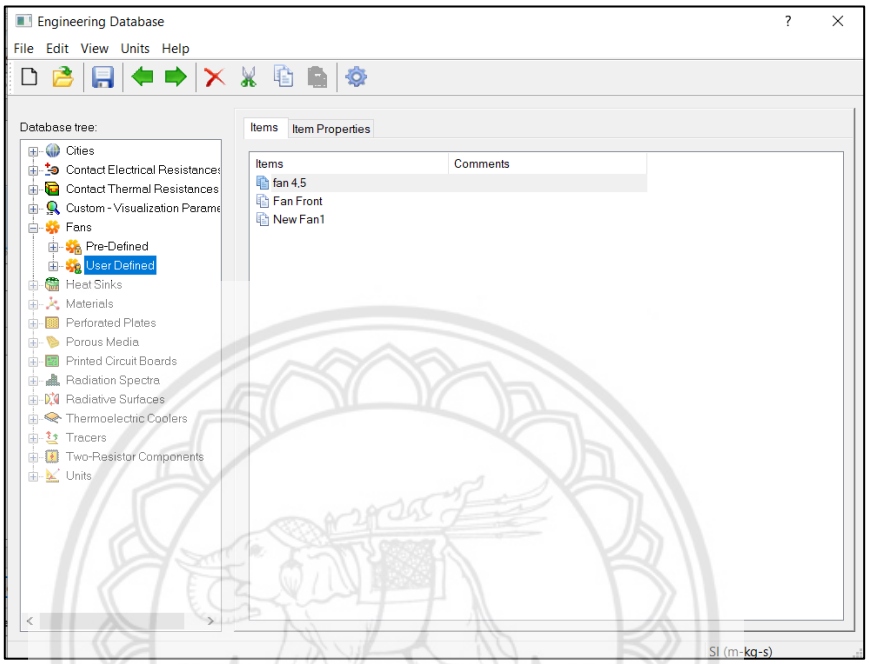
6.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Conditions

เลือก Fan



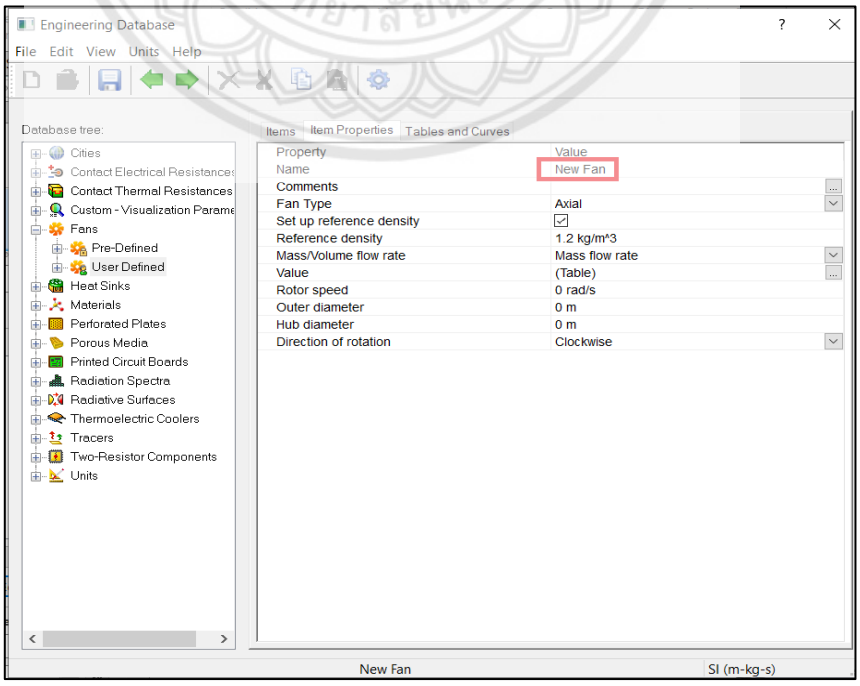
6.2 คลิกเลือก Create/Edit

6.3 จะแสดง Tool bar ที่มีชื่อว่า Engineering Database ขึ้นมา

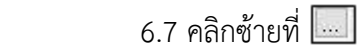


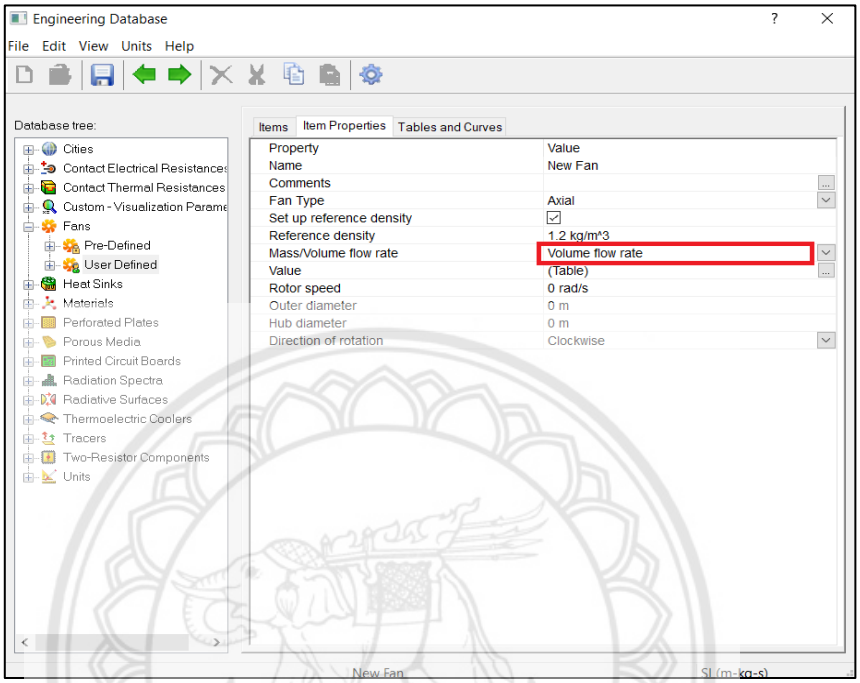
6.4 คลิกเลือก New Item

6.5 คลิก Name Fans เพื่อตั้งชื่อพัดลม

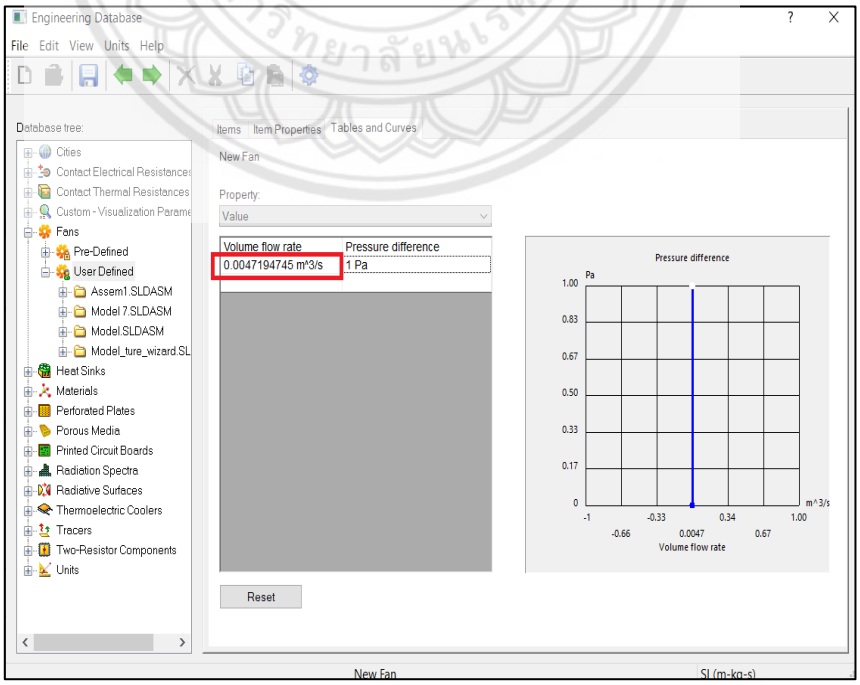


6.6 กำหนดการไหลเป็นแบบ Volume Flow Rate

6.7 คลิกซ้ายที่ 

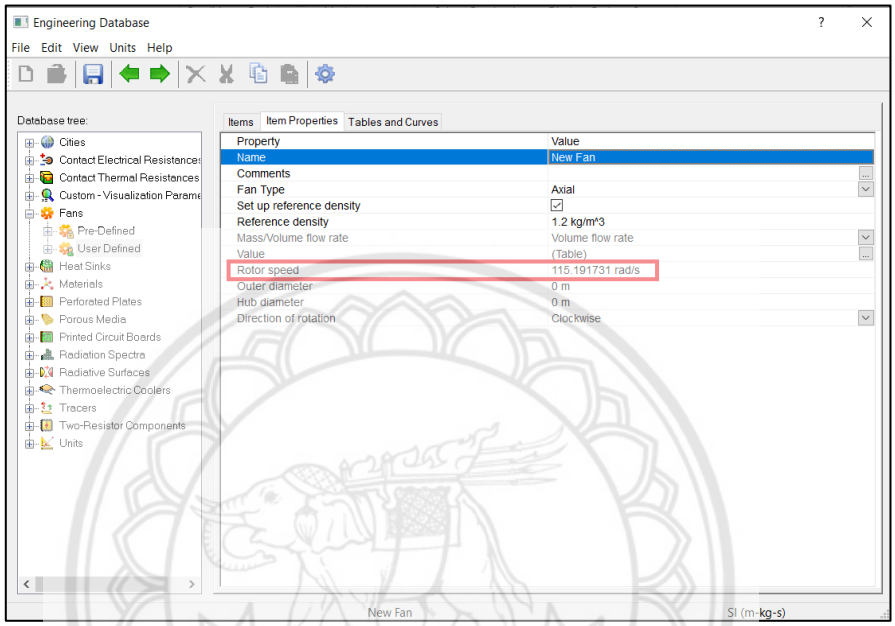


6.8 กำหนดอัตราการไหลของพัดลม (ในกรณีศึกษานี้ปริมาณการไหล คือ 10-50 CFM ให้เปลี่ยนเป็นหน่วย m^3/s)



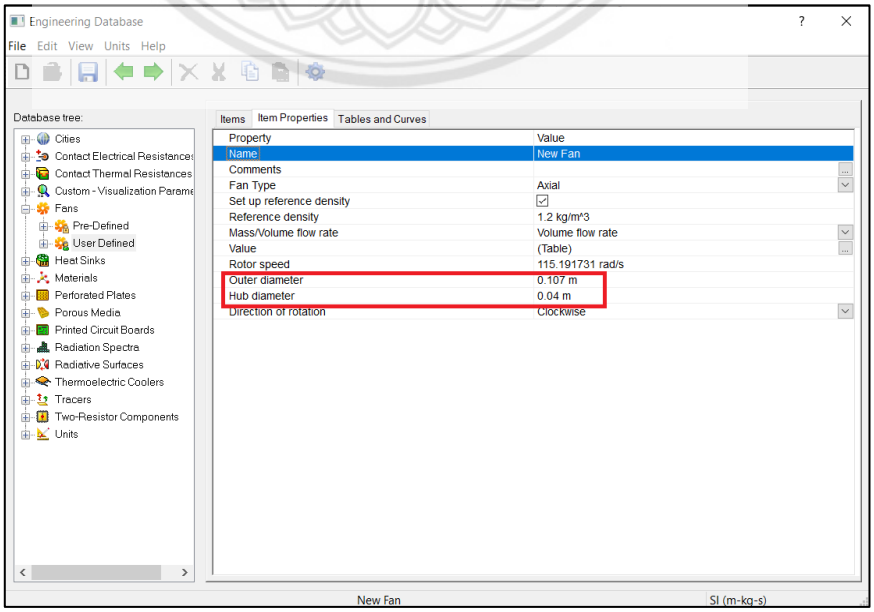
6.9 คลิกซ้ายเลือก Item Properties

6.10 กำหนดความเร็วในการหมุนของพัดลม (ในกรณีศึกษานี้ความเร็วของพัดลม คือ 1100 rpm ให้เปลี่ยนเป็นหน่วย rad/s)

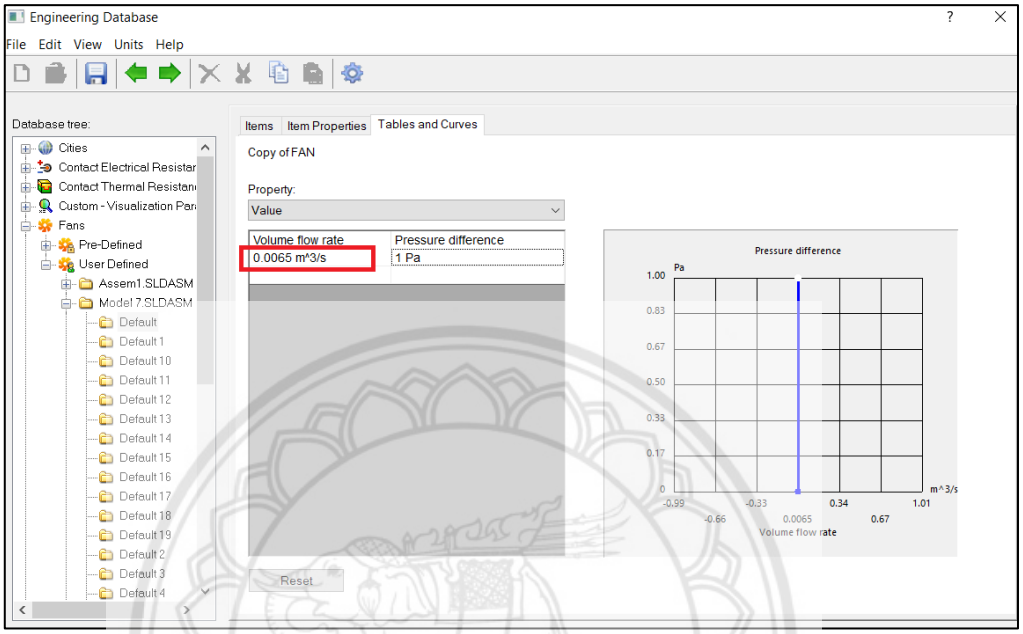


6.11 กำหนดขนาดของพัดลม (ในกรณีศึกษานี้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอยู่ที่ 107 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง Hub อยู่ที่ 40 mm)

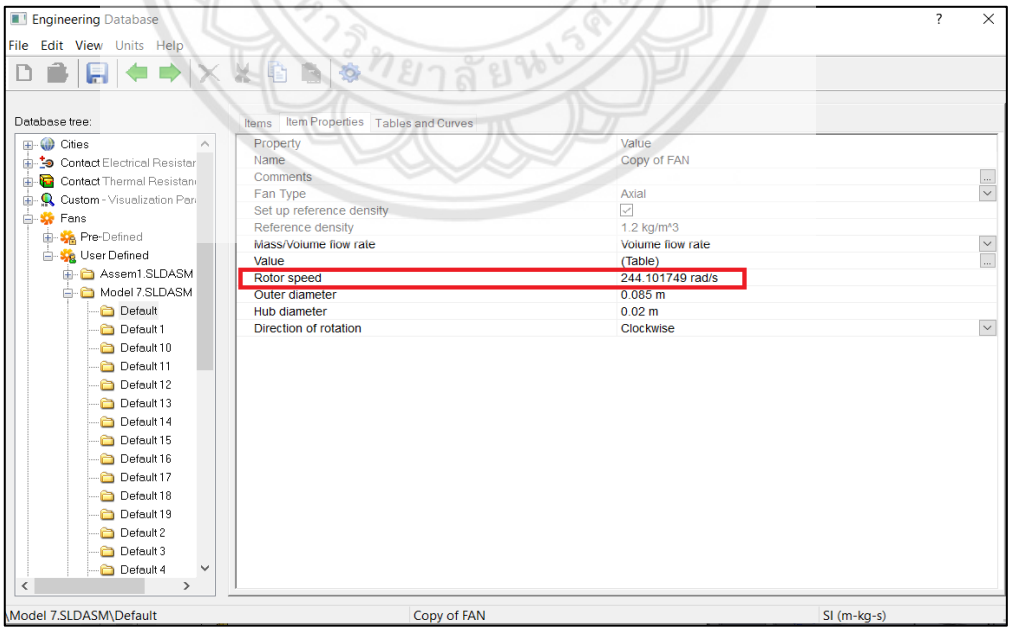
6.12 คลิกเลือก Save เพื่อทำการบันทึก



6.13 กำหนดอัตราการไหลของพัดลมของ CPU และ Chip GPU (ในกรณีศึกษานี้ปริมาณการไหล คือ 14 CFM ให้เปลี่ยนเป็นหน่วย m^3/s)

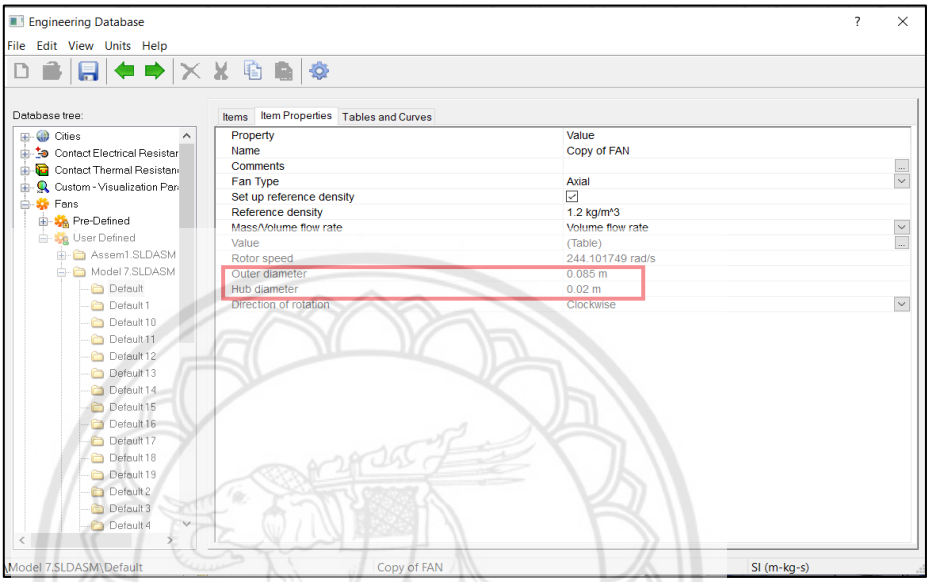


6.14 กำหนดความเร็วในการหมุนของพัดลม (ในกรณีศึกษานี้ความเร็วของพัดลม คือ 2331 rpm ให้เปลี่ยนเป็นหน่วย rad/s)



6.15 กำหนดขนาดของพัดลม (ในกรณีศึกษานี้ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอยู่ที่ 85 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง Hub อยู่ที่ 20 mm)

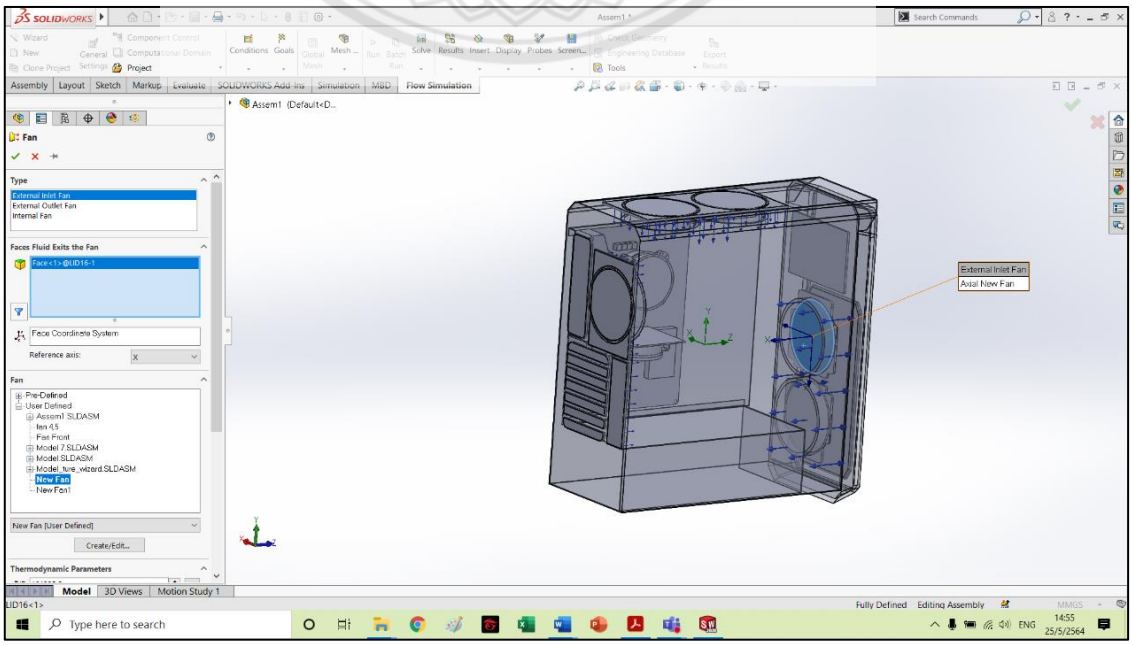
6.16 คลิกเลือก Save เพื่อทำการบันทึก



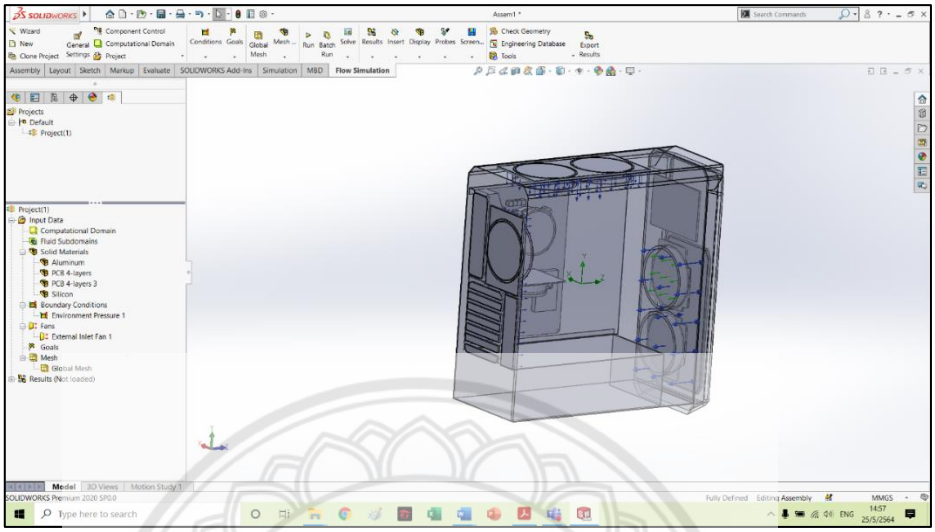
6.17 คลิกเลือก External Inlet Fan

6.18 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดเข้า คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.19 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.20 คลิก OK



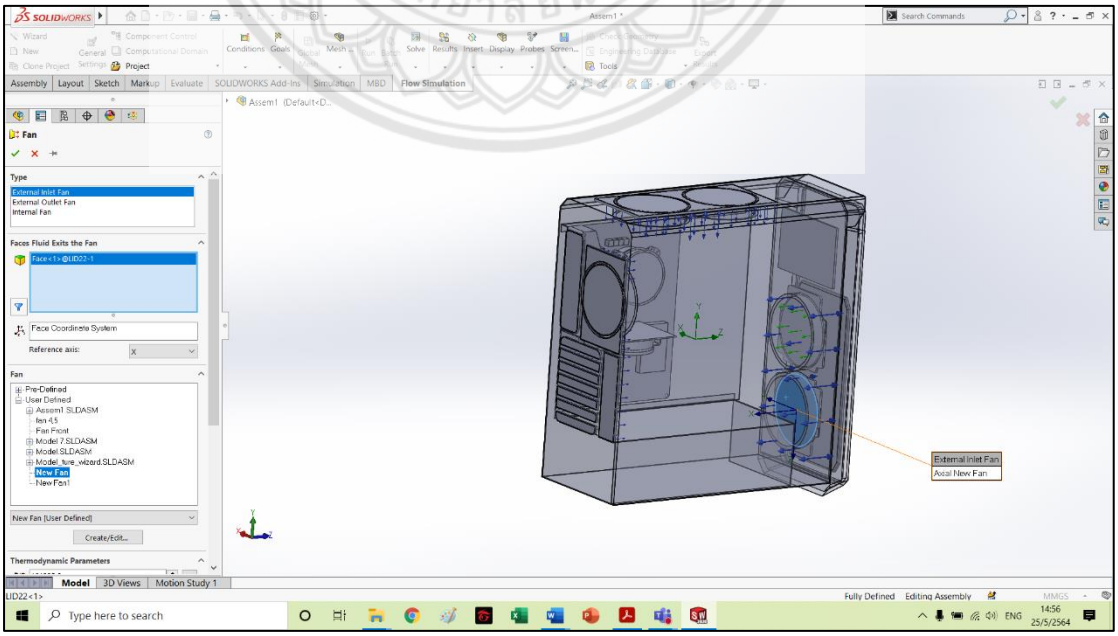
6.21 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans

เลือก Insert Fans

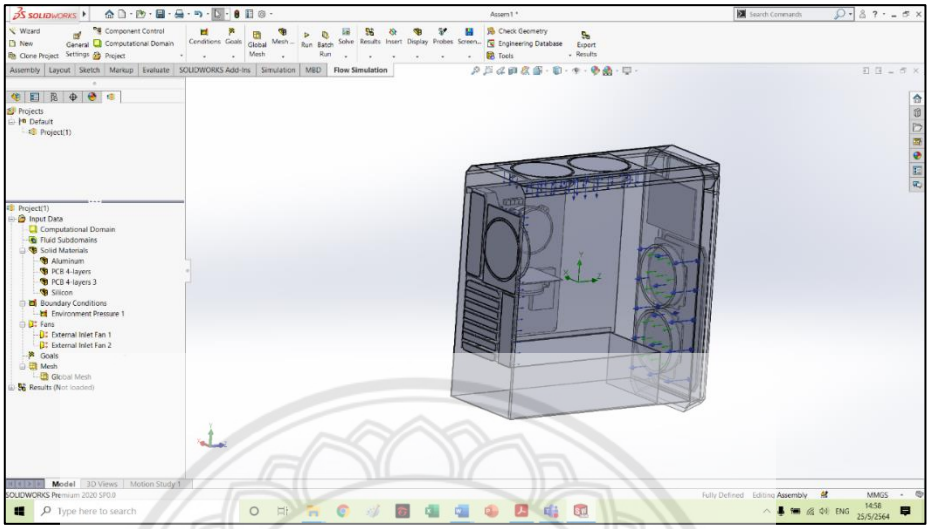
6.22 คลิกเลือก External Inlet Fans

6.23 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดเข้า คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.24 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.25 คลิก OK

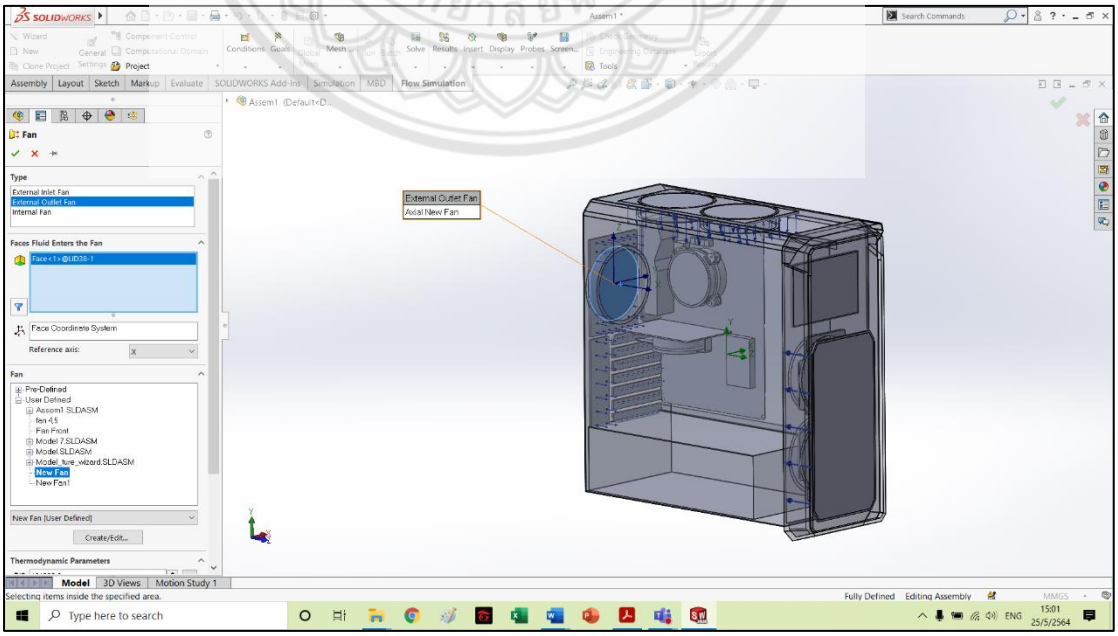


6.26 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans เลือก Insert Fans

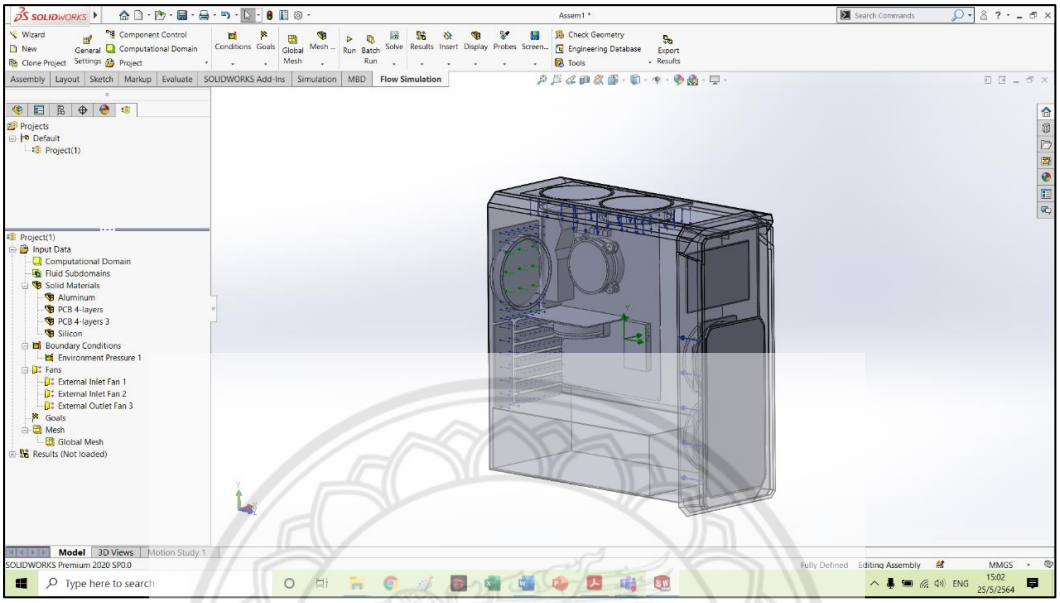
6.27 คลิกเลือก External Outlet Fans

6.28 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดออก คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.29 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.30 คลิก OK

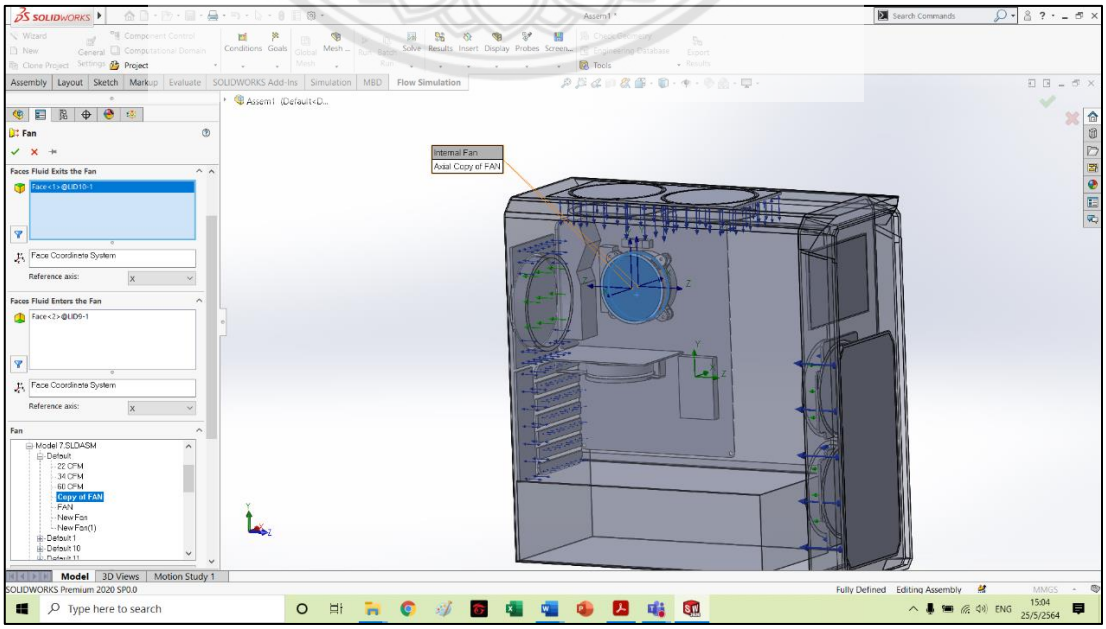


6.31 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans เลือก Insert Fans

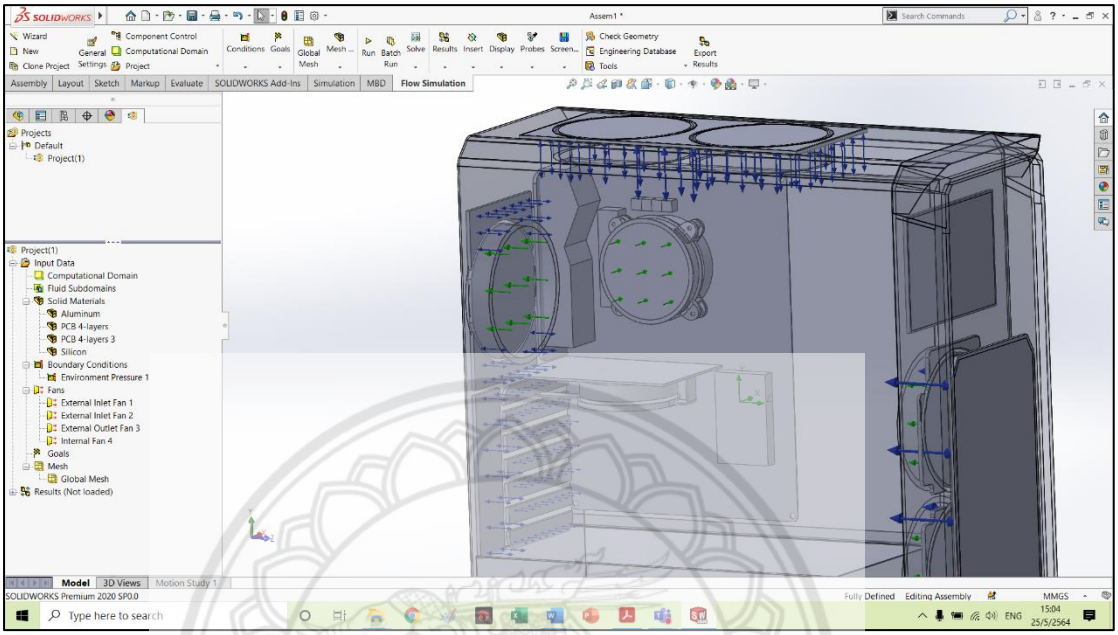
6.32 คลิกเลือก Internal Fan

6.33 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดเข้าและพัดออก คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.34 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.35 คลิก OK

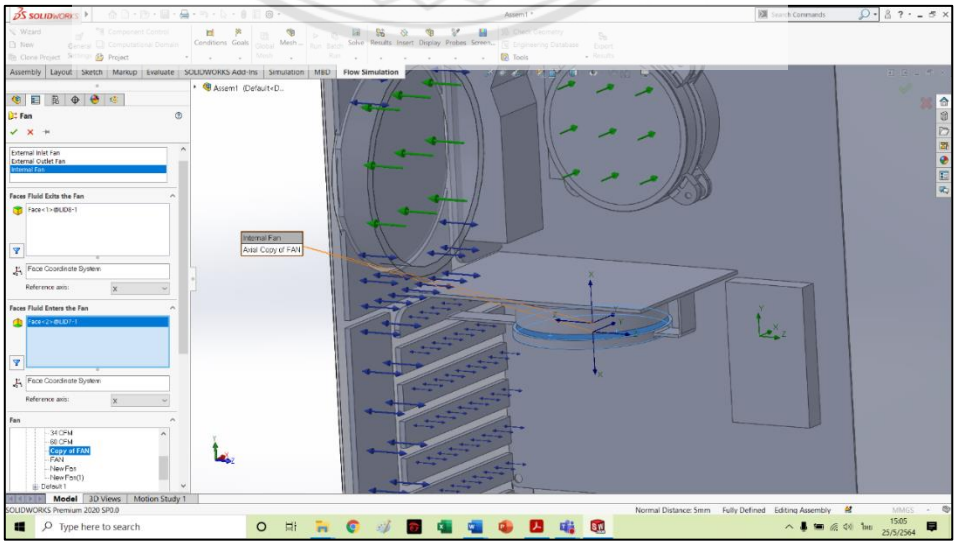


6.36 คลิกขวาที่คำสั่ง Fans เลือก Insert Fans

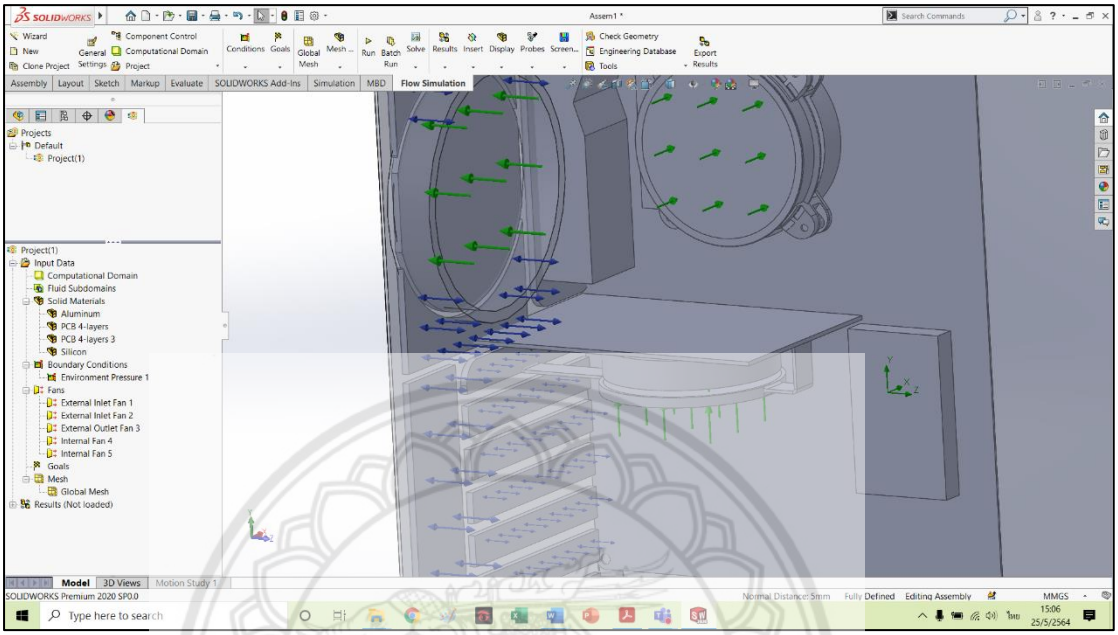
6.37 คลิกเลือก Internal Fan

6.38 คลิกเลือก Lids ที่ต้องการติดตั้งพัดลมระบายอากาศพัดเข้าและพัดออก คลิกหน้าตัดภายในของ Lids

6.39 เลือกพัดลมที่สร้างขึ้น



6.40 คลิก OK

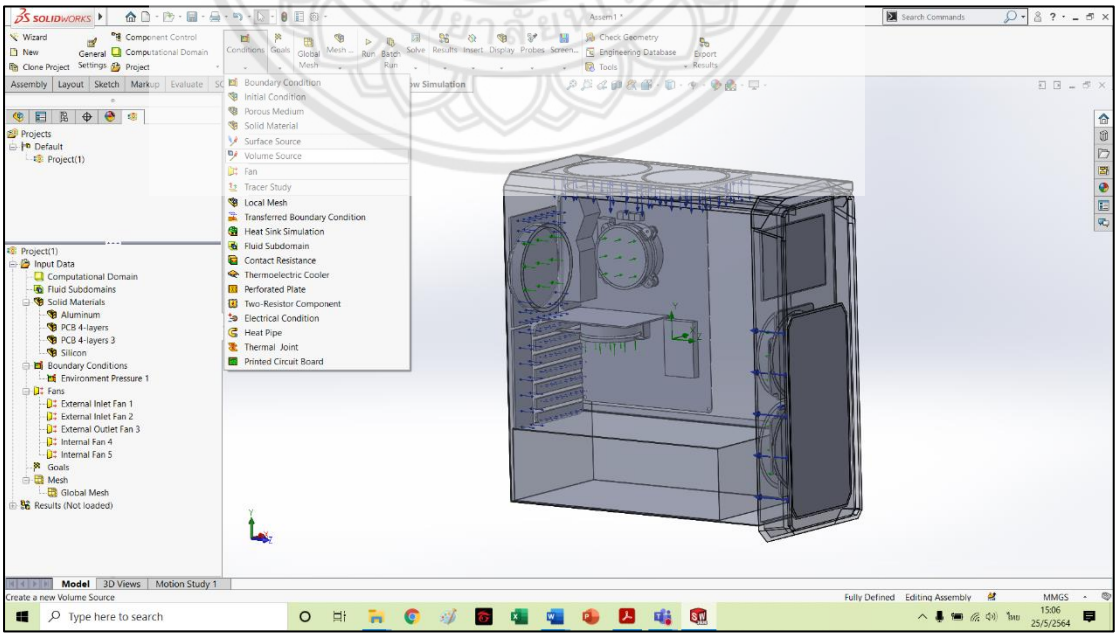


7. การกำหนดแหล่งกำเนิดความร้อน

7.1 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนของ CPU

7.1.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Conditions

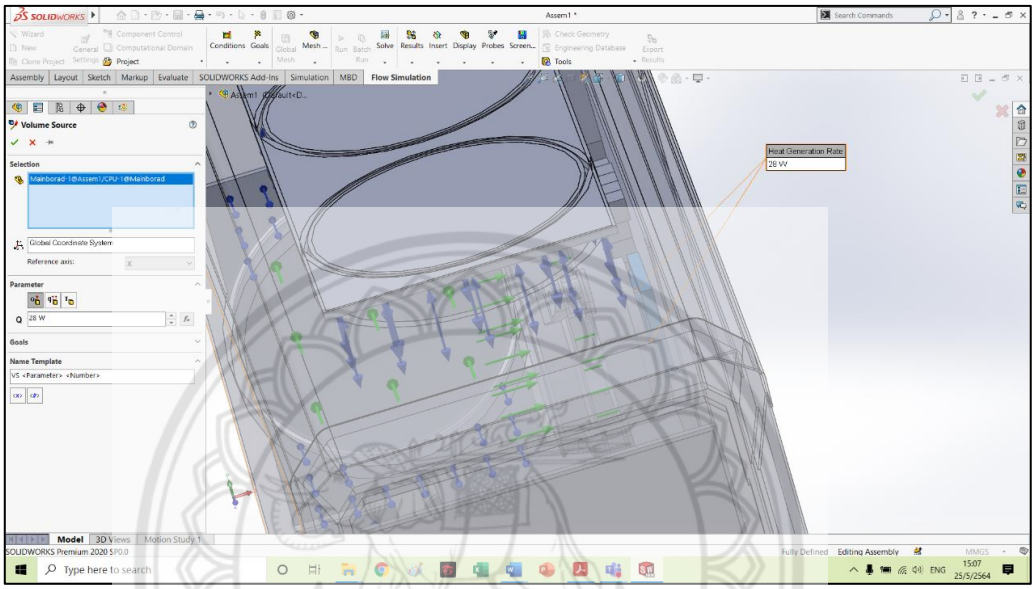
เลือก Volume Source



7.1.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนที่เป็น CPU

7.1.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Heat Generation Rate

7.1.4 ในกรณีศึกษานี้กำหนด Heat Generation Rate เท่ากับ 28 W

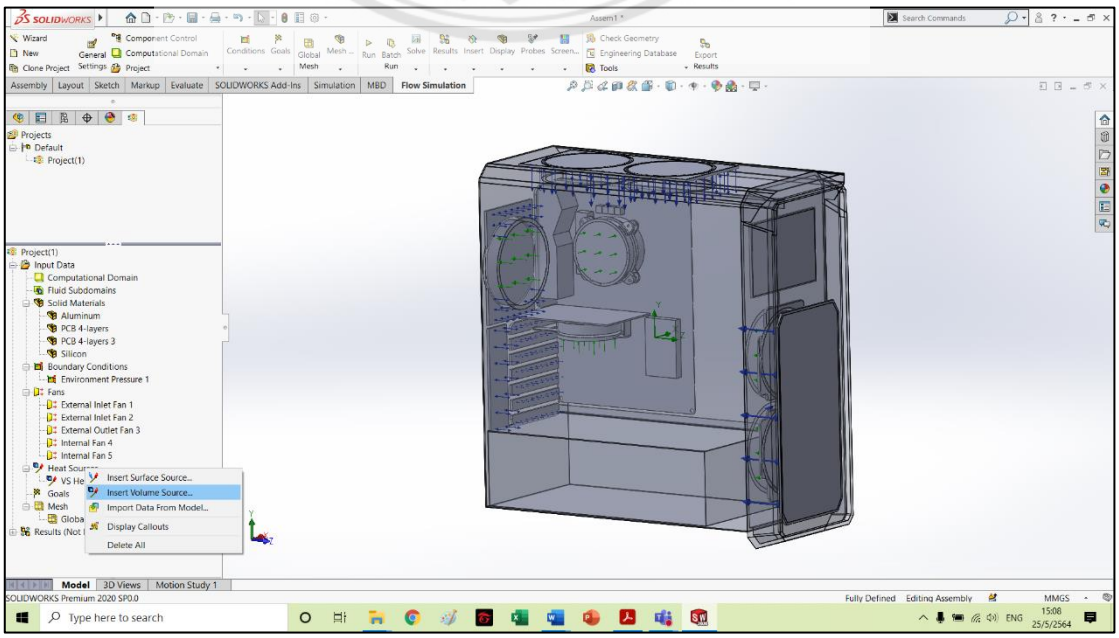


7.1.5 คลิก OK

7.2 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนภาคจ่ายไฟขนาดเล็ก

7.2.1 คลิกขวาที่ คำสั่ง Heat Source

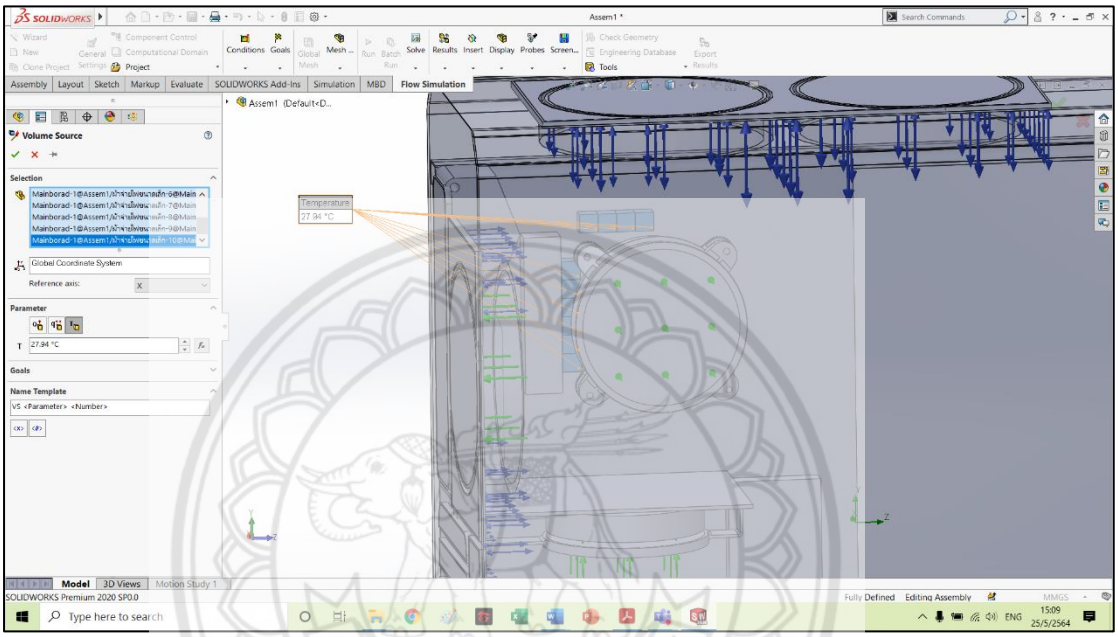
เลือก Insert Volume Source



7.2.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนภาคจ่ายไฟขนาดเล็กทั้งหมด 10 ชิ้น

7.2.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.2.4 ในกรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 27.94 ºC



7.2.5 คลิก OK

7.3 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนภาคจ่ายไฟขนาดกลาง

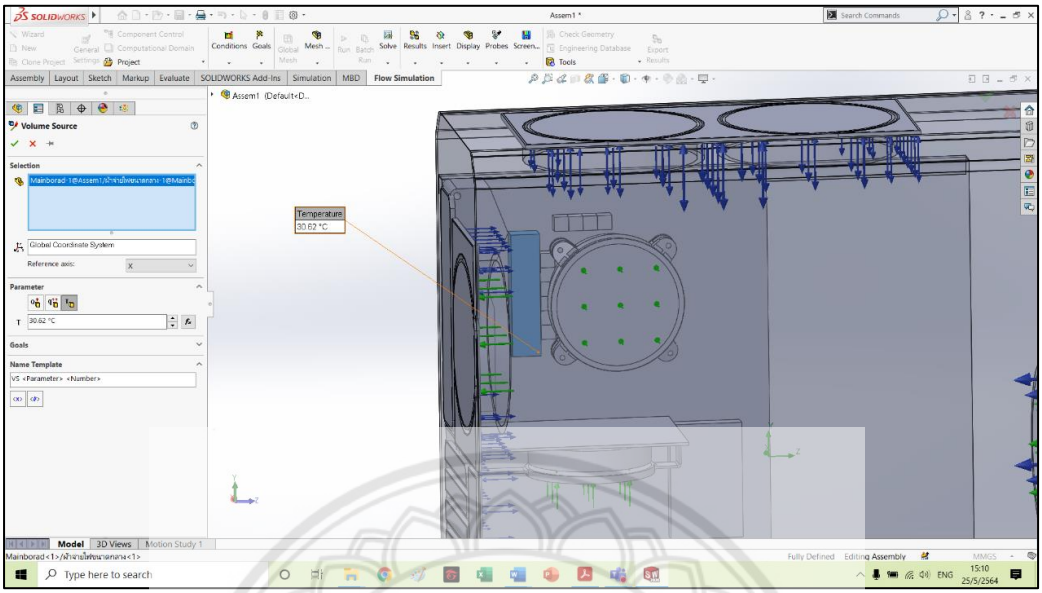
7.3.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

เลือก Insert Volume Source

7.3.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนภาคจ่ายไฟขนาดกลางทั้งหมด 1 ชิ้น

7.3.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.3.4 ในกรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 30.62 ºC



7.3.5 คลิก OK

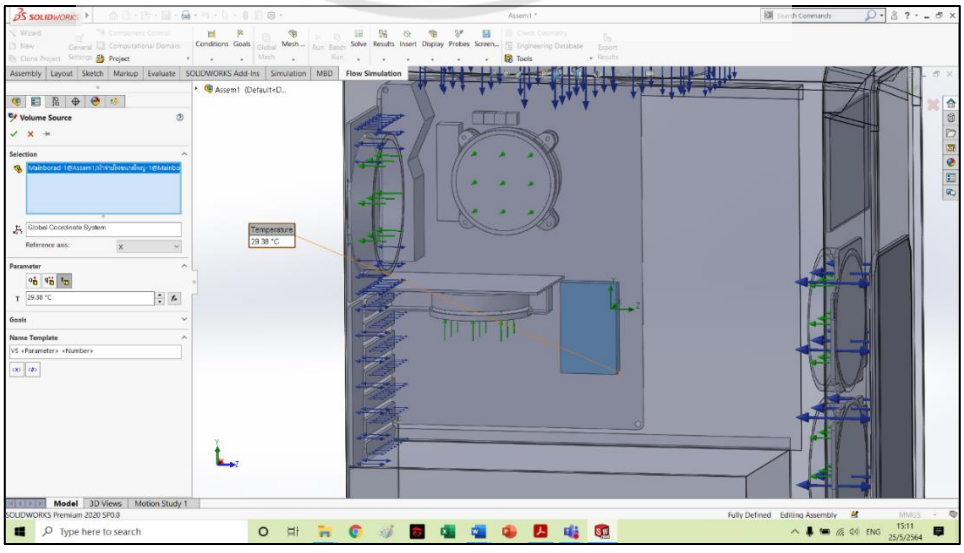
7.4 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนภาคจ่ายไฟขนาดใหญ่

7.4.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source เลือก Insert Volume Source

7.4.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนภาคจ่ายไฟขนาดใหญ่ทั้งหมด 1 ชิ้น

7.4.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Temperature

7.4.4 ในกรณีศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 29.38 °C



7.5 กำหนดแหล่งกำเนิดความร้อนภาคจ่ายไฟของ Chip GPU

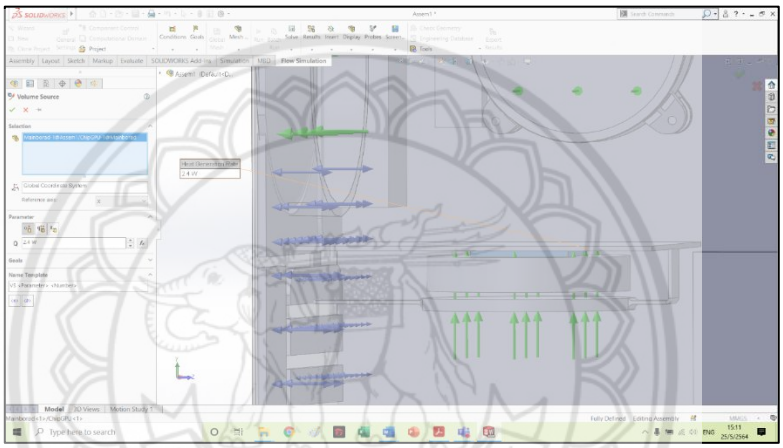
7.5.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Heat Source

เลือก Insert Volume Source

7.5.2 คลิกเลือกชิ้นส่วนภาคจ่ายไฟของ Chip GPU ทั้งหมด 1 ชิ้น

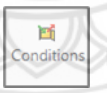
7.5.3 คลิกเลือกการกำเนิดความร้อนเป็น Heat Generation Rate

7.5.4 ในกรณีศึกษานี้กำหนด Heat Generation Rate เท่ากับ 2.4 W

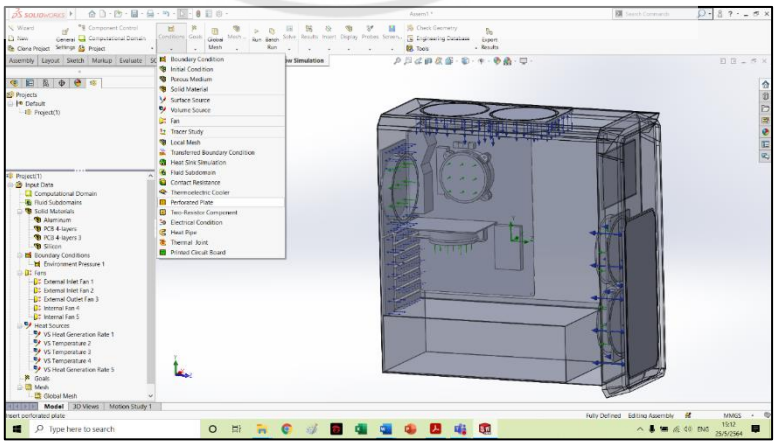


7.5.5 คลิก OK

8. การกำหนดรูพรุน

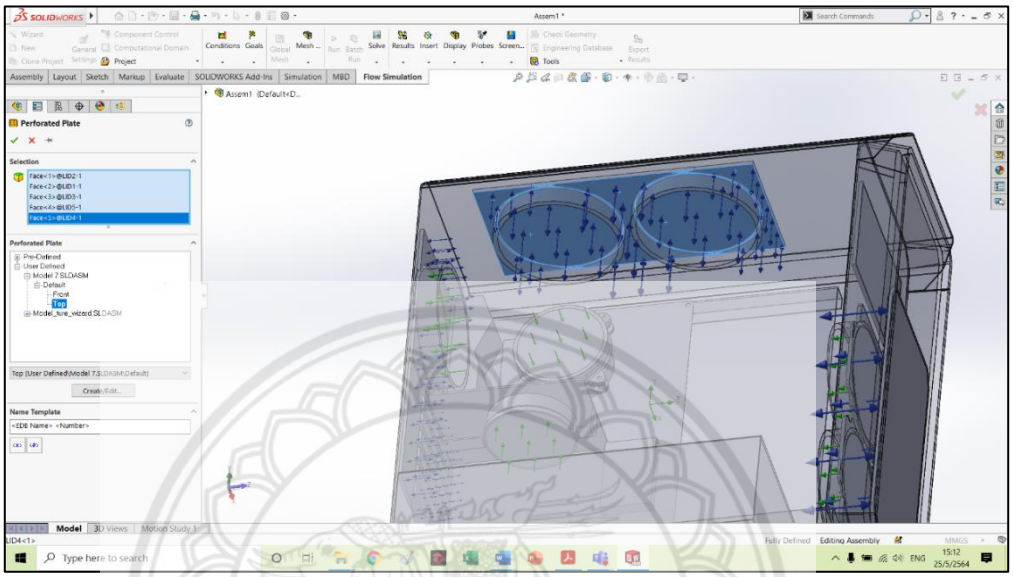
8.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Conditions 

เลือก Perforated Plate



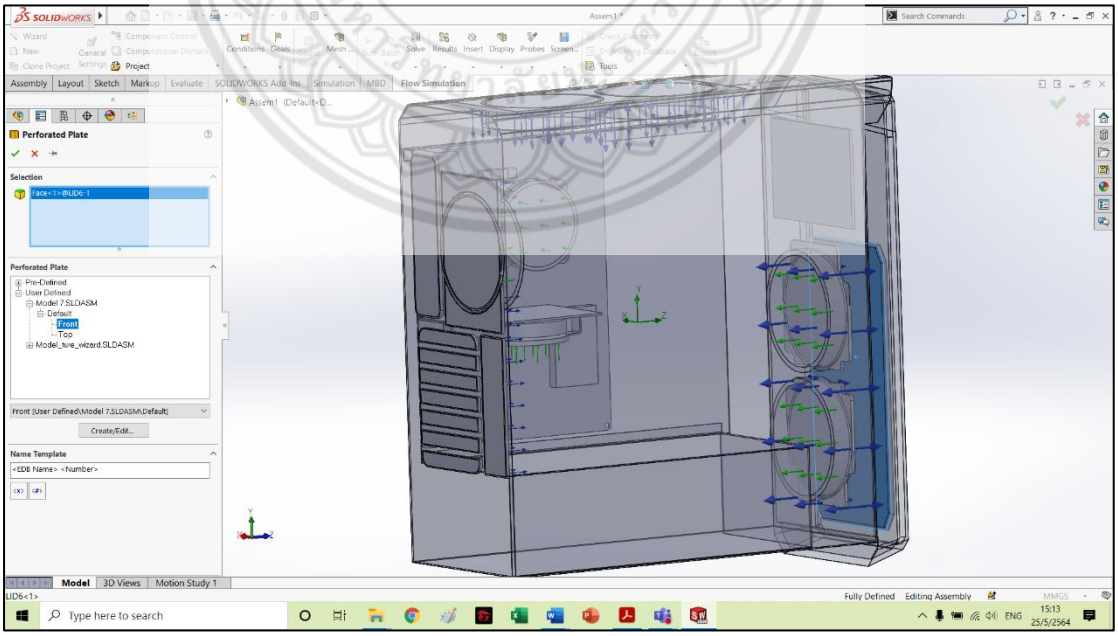
8.2 คลิกเลือกพื้นที่ภายใน Lids ที่มีพื้นที่เป็นรูพรุน

8.2.1 คลิกเลือกรูพรุนเป็นแบบ Top



8.2.2 คลิก OK

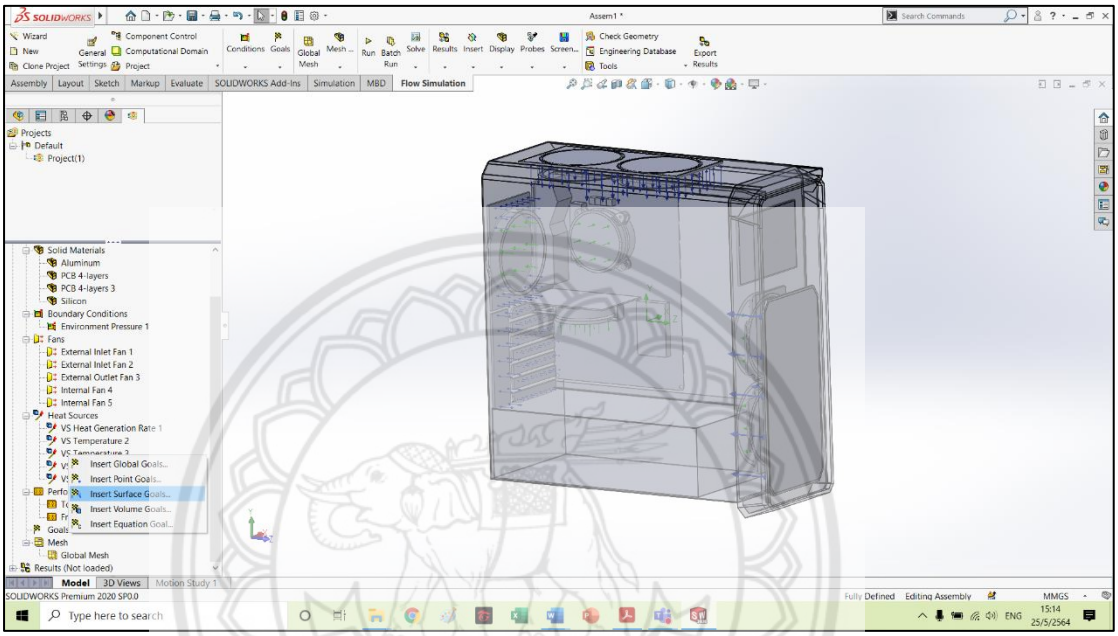
8.2.3 คลิกเลือกรูพรุนเป็นแบบ Front



8.2.4 คลิก OK

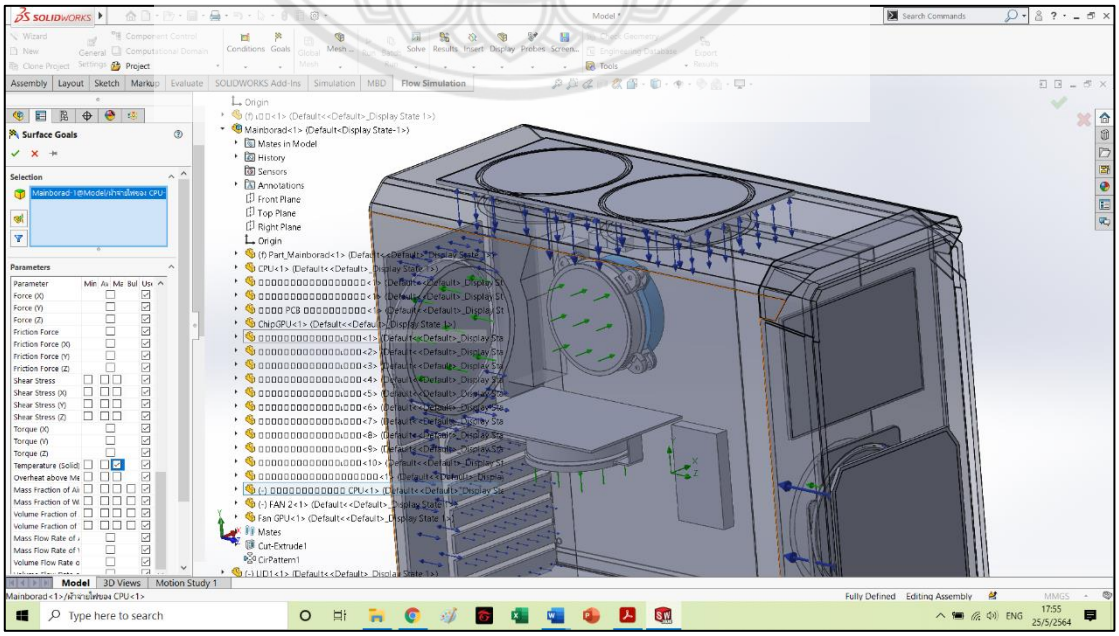
9. การกำหนดชิ้นส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนของ CPU

9.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Goals เลือก Insert Surface Goals



9.2 คลิกเลือกภาคจ่ายไฟของ CPU

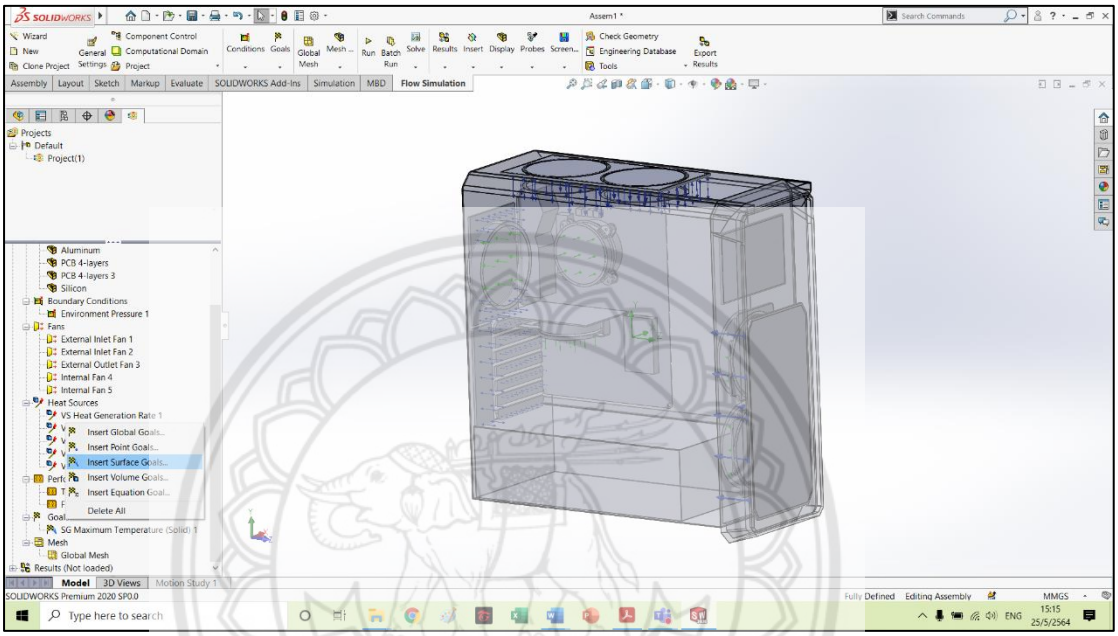
9.3 คลิกเช็คถูกที่ Temperature (Solid)



9.4 คลิก OK

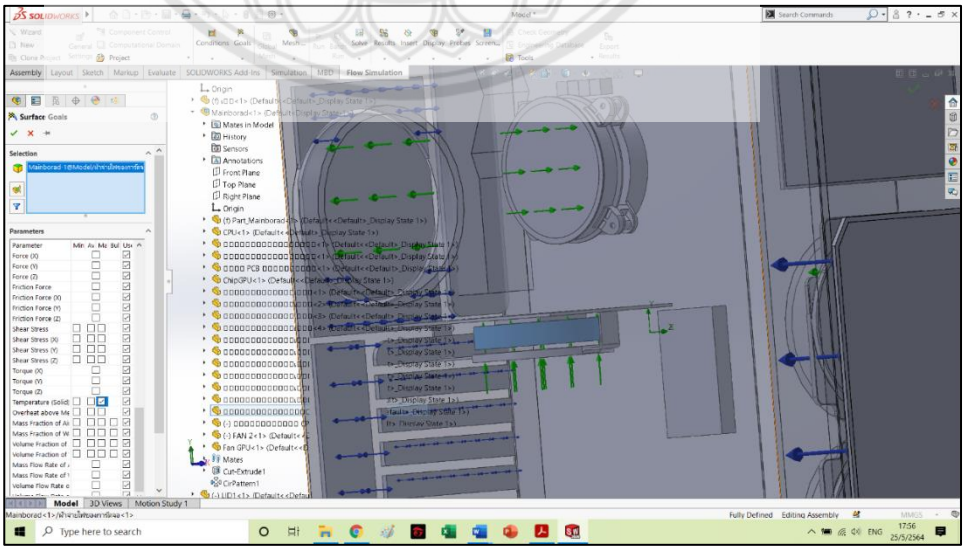
10. การกำหนดชิ้นส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนของการ์ดแสดงผล

10.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Goals Goals เลือก Insert Surface Goals



10.2 คลิกเลือกภาคจ่ายไฟของการ์ดแสดงผล

10.3 คลิกเช็คถูกที่ Temperature (Solid)

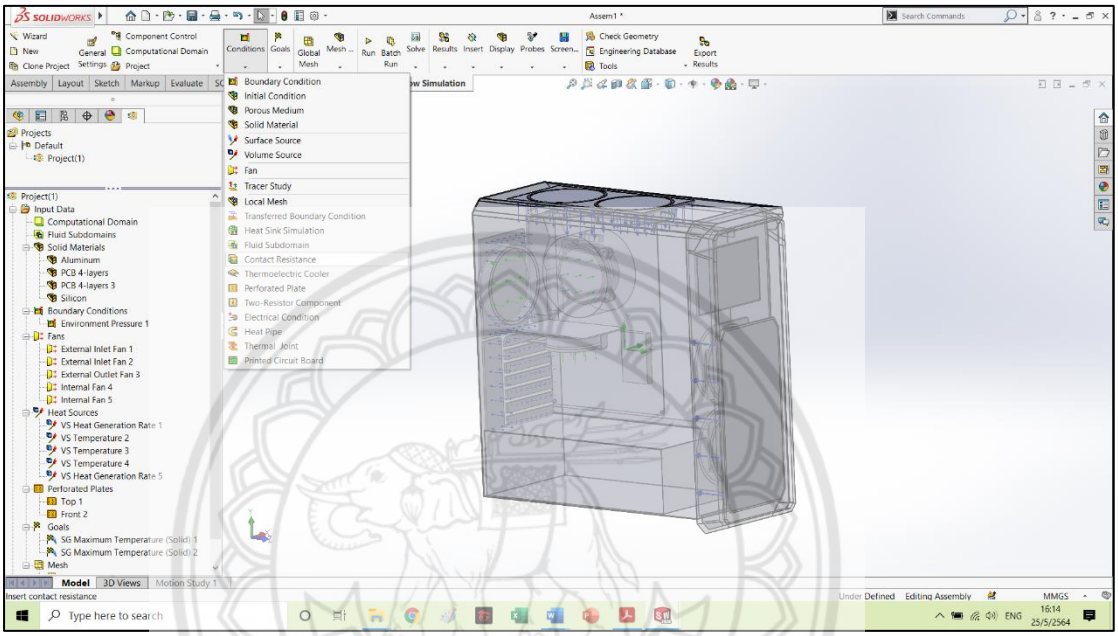


10.4 คลิก OK

11. การกำหนดความต้านทาน Contact Resistance

11.1 คลิกซ้ายที่คำสั่ง Conditions

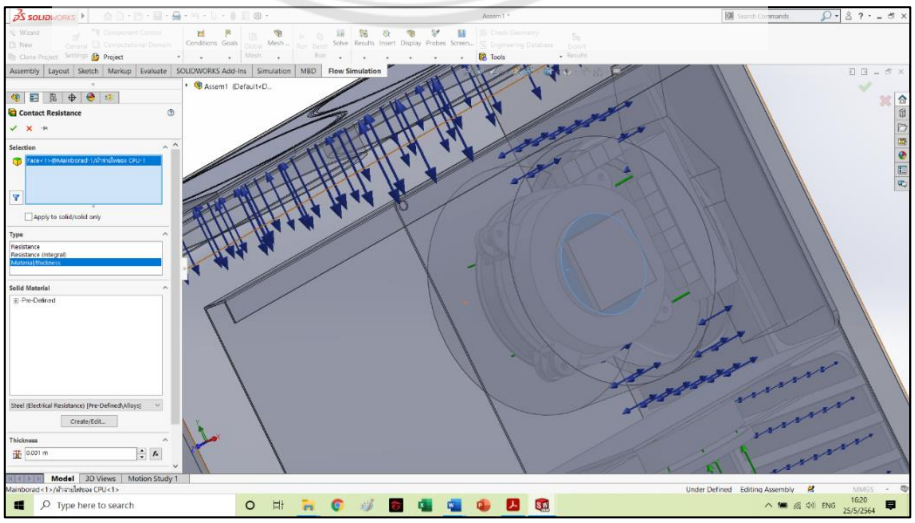
แล้วเลือก Contact Resistance



11.2 คลิกเลือกบริเวณภาคจ่ายไฟของ CPU ที่สัมผัสกับ CPU

11.3 คลิกเลือกที่ Material/thickness

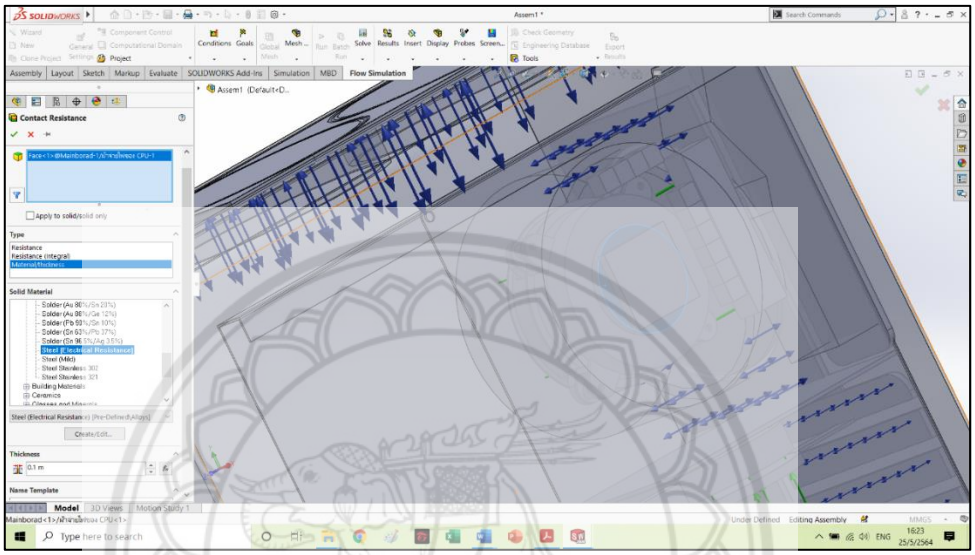
11.4 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Pre – Defined



11.5 คลิกเครื่องหมาย (+) ด้านหน้าของ Alloys

11.6 คลิกเลือกที่ Steel (Electrical Resistance)

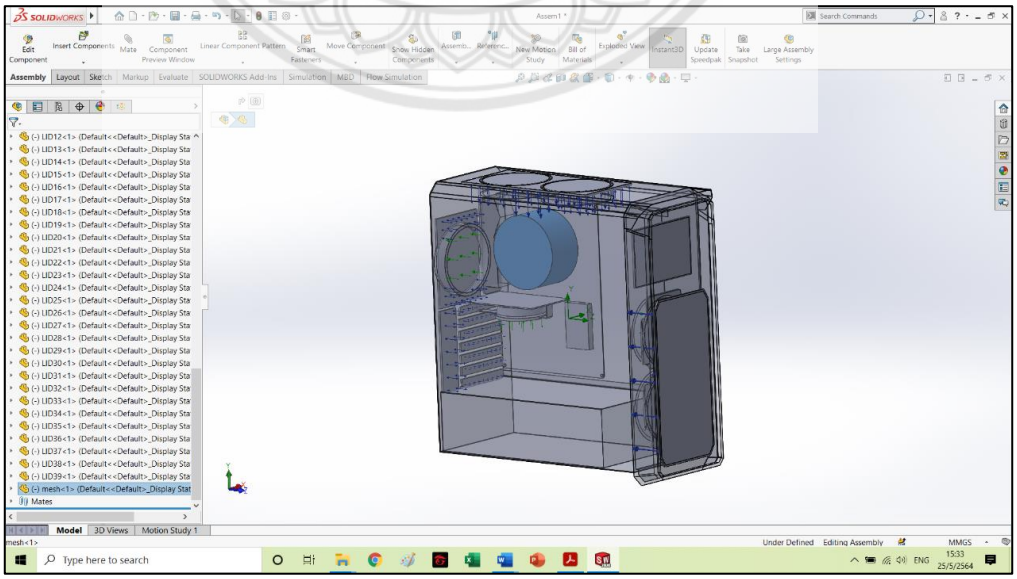
11.7 กำหนดค่า Thickness เท่ากับ 0.1 m



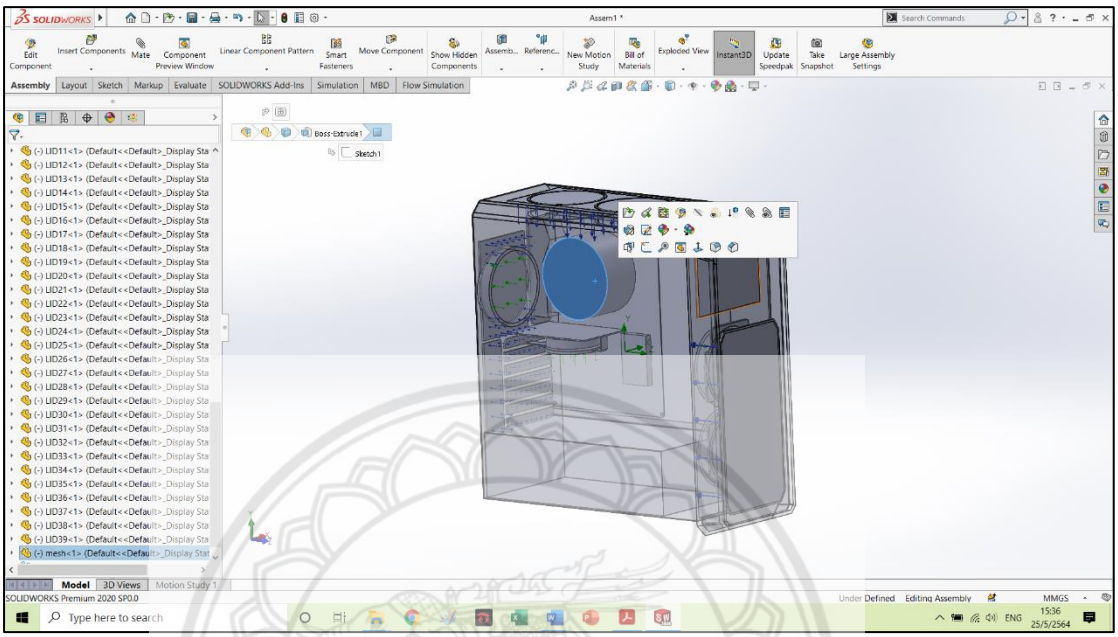
11.8 คลิก OK

12. การวิเคราะห์ก้อน Mesh Solid

12.1 ทำการประกอบก้อน Mesh Solid ให้ครอบคลุม CPU

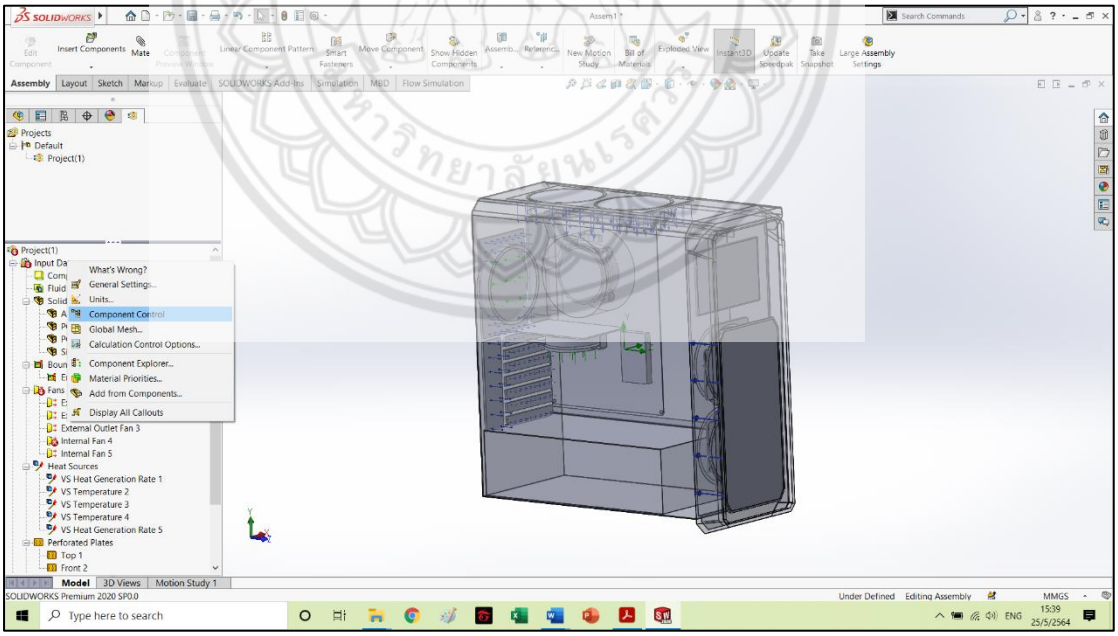


12.2 คลิกซ้ายที่ก้อน Mesh Solid แล้วเลือกคำสั่ง Change Transparency

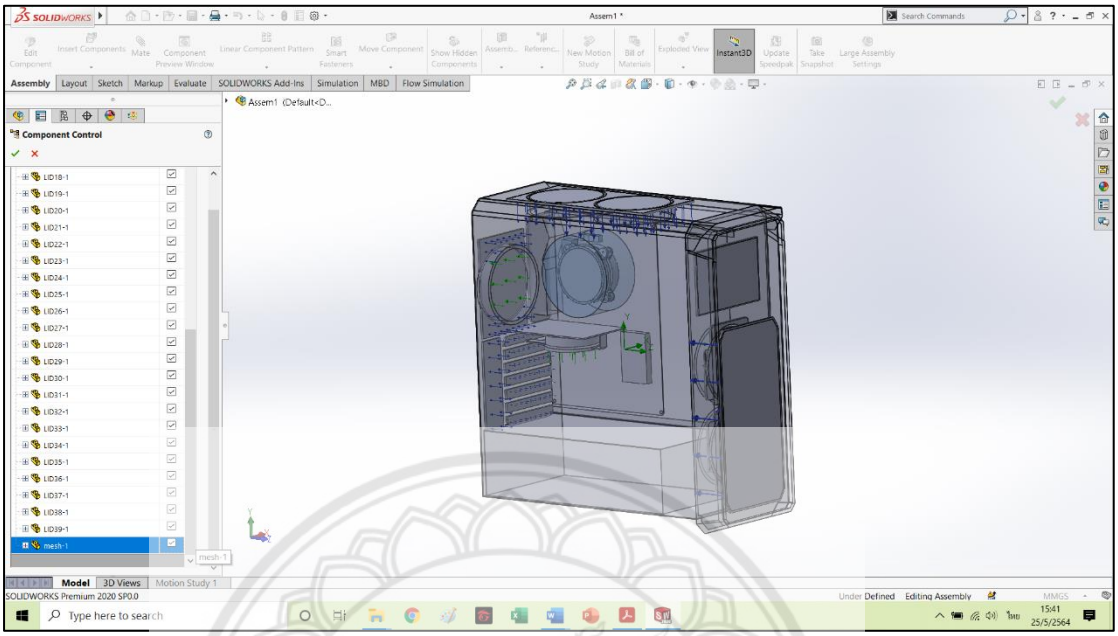


12.3 คลิกขวาที่คำสั่ง Input Data

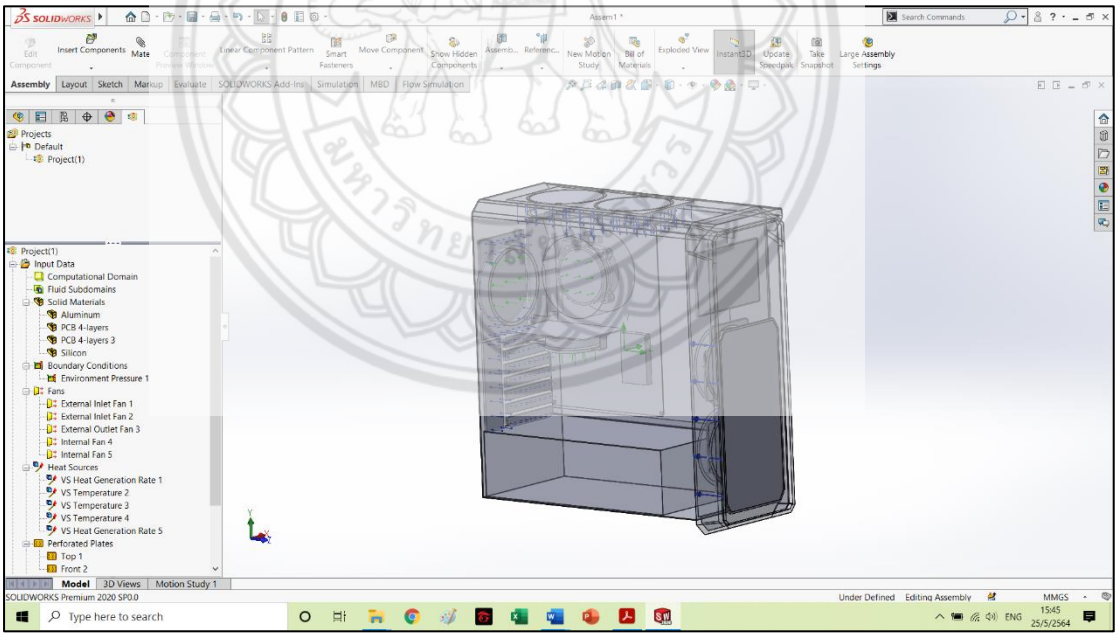
เลือก Component Control



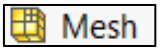
12.4 คลิกเช็คถูกที่ mesh - 1 ออก

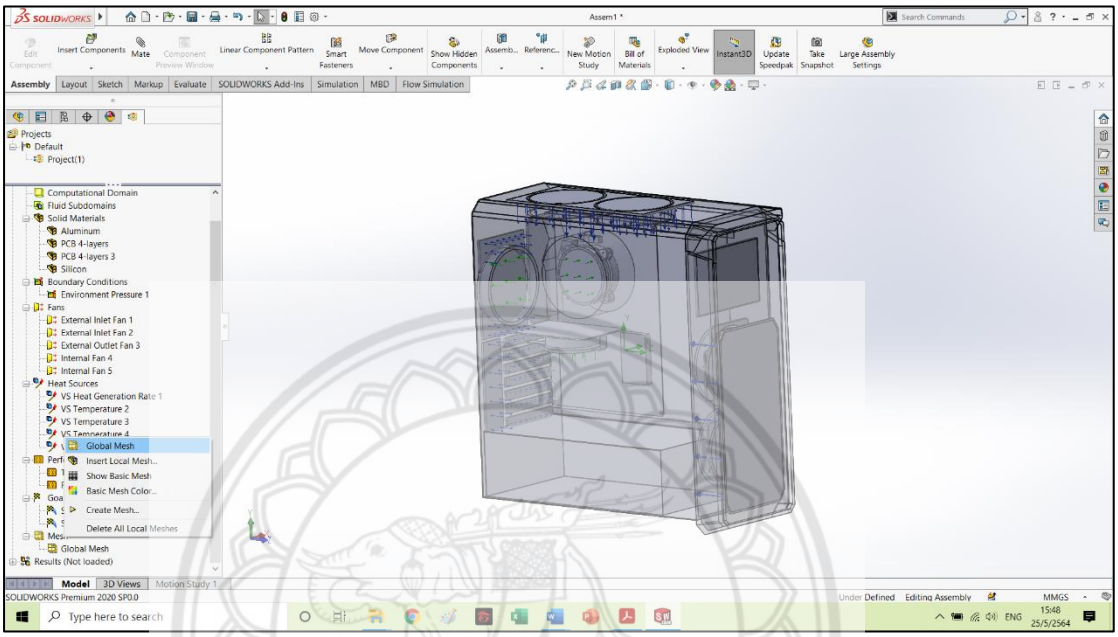


12.5 คลิก OK

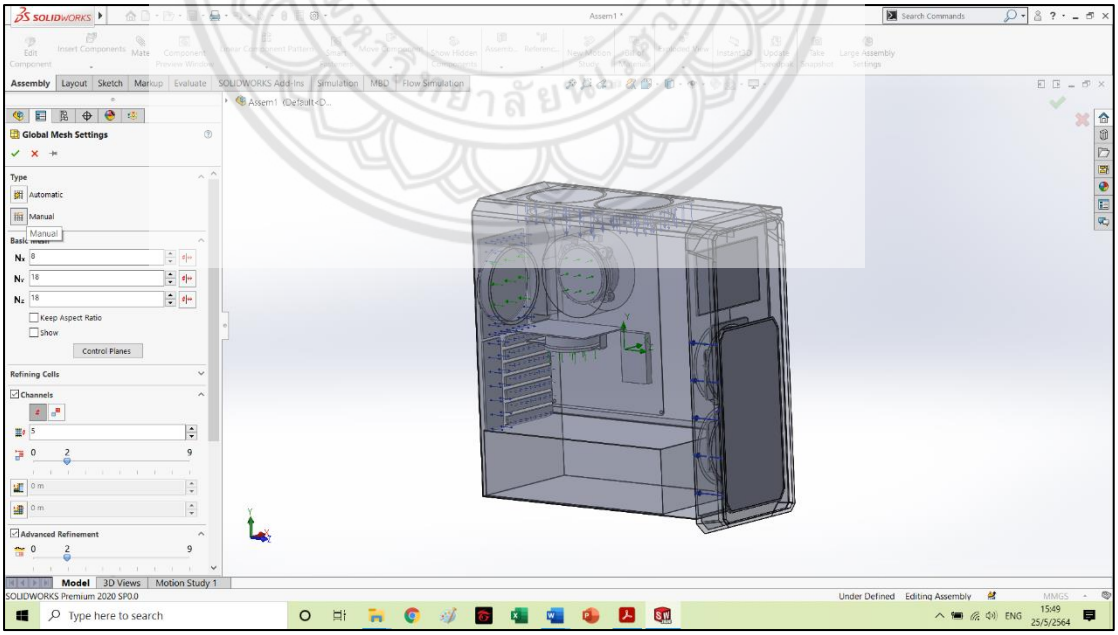


13. การวิเคราะห์ Mesh

13.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Mesh  แล้วเลือก Global Mesh

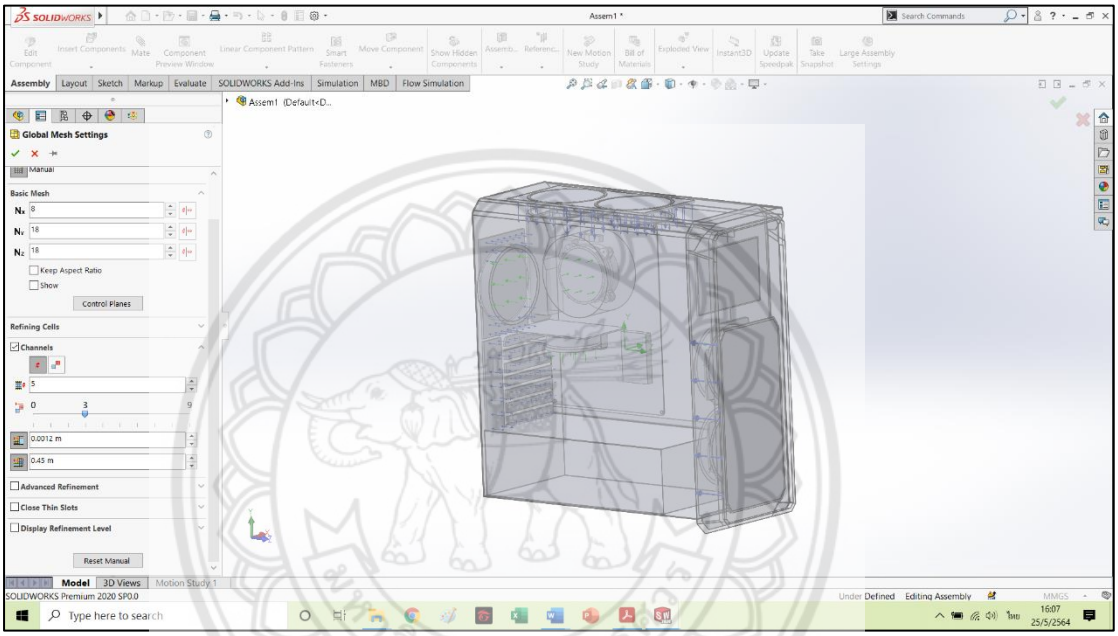


13.2 คลิกเลือกที่ Manual



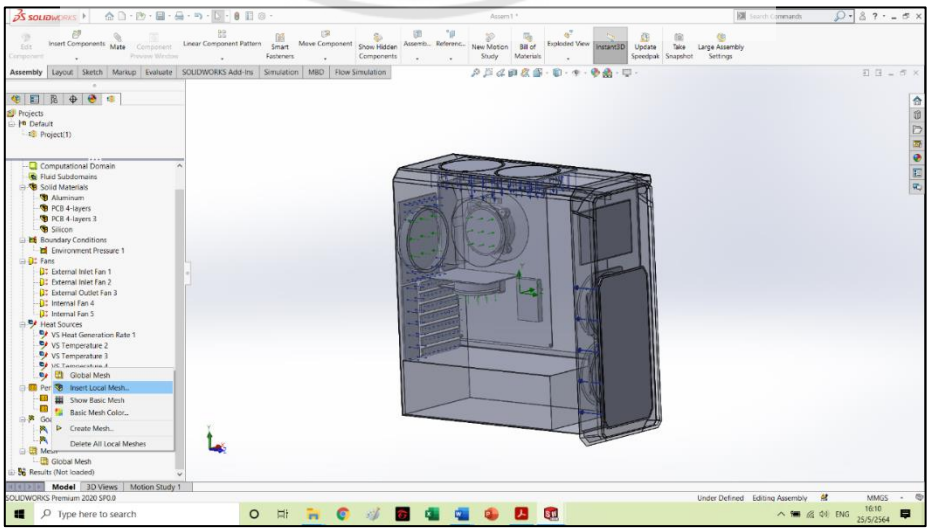
13.3 ทำการปรับค่าในหัวข้อ Channel โดยปรับค่า Characteristic Number of Cells Across Channel เท่ากับ 5 ค่า Maximum Refinement Level เท่ากับ 3 ค่า Minimum Height of Channel to Refine เท่ากับ 0.0012 m และค่า Maximum Height of Channel to Refine เท่ากับ 0.45 m

13.4 คลิกเช็คถูกที่ช่อง Advanced Refinement ออก



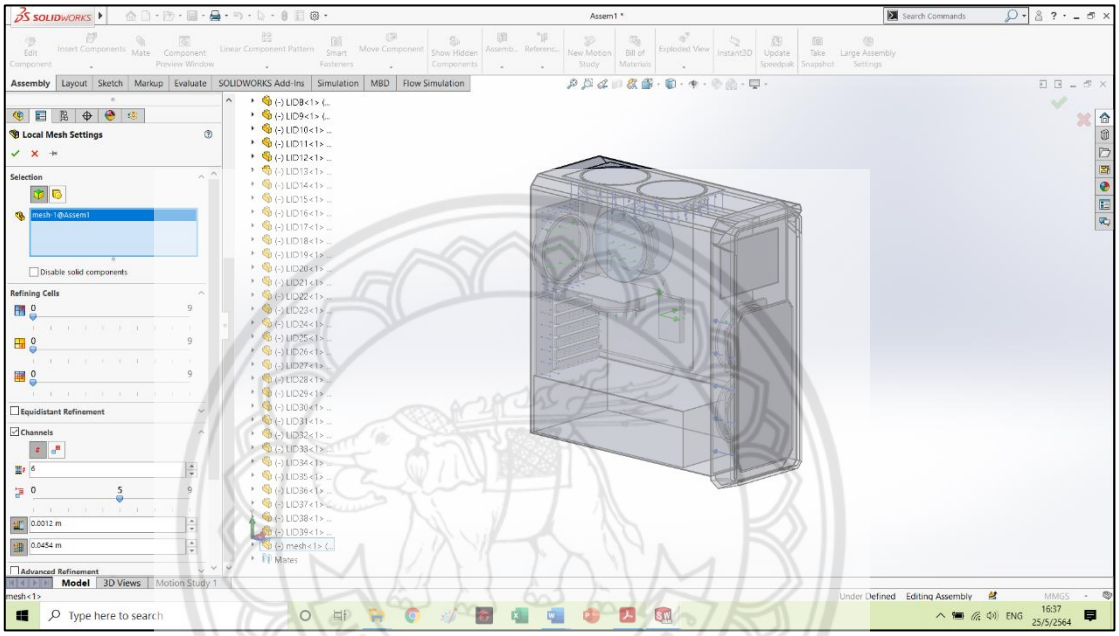
13.5 คลิก OK

13.6 คลิกขวาที่คำสั่ง Mesh แล้วเลือก Insert Local Mesh



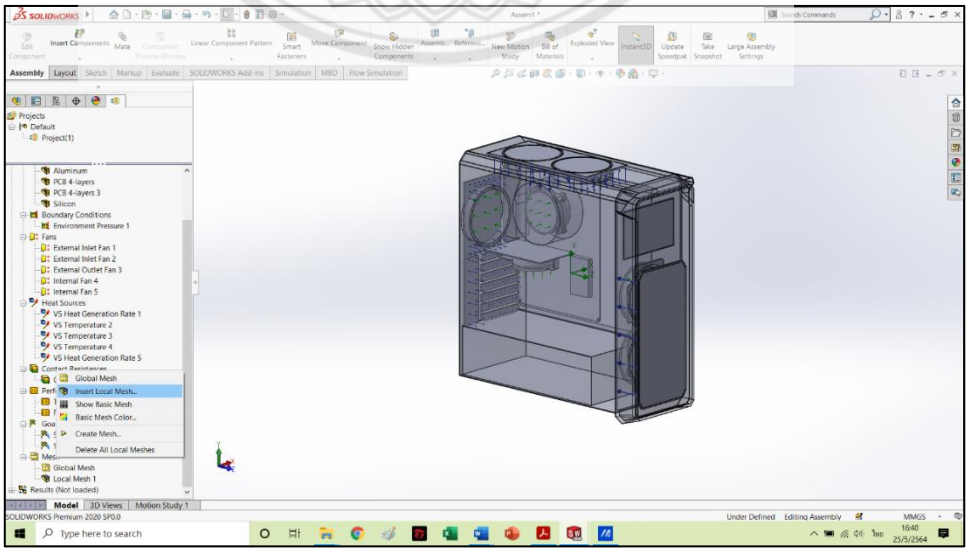
13.7 คลิกเลือก Mesh – 1

13.8 ทำการปรับค่าในหัวข้อ Channel โดยปรับค่า Characteristic Number of Cells Across Channel เท่ากับ 6 ค่า Maximum Refinement Level เท่ากับ 5 และค่า Maximum Height of Channel to Refine เท่ากับ 0.0454 m



13.9 คลิก OK

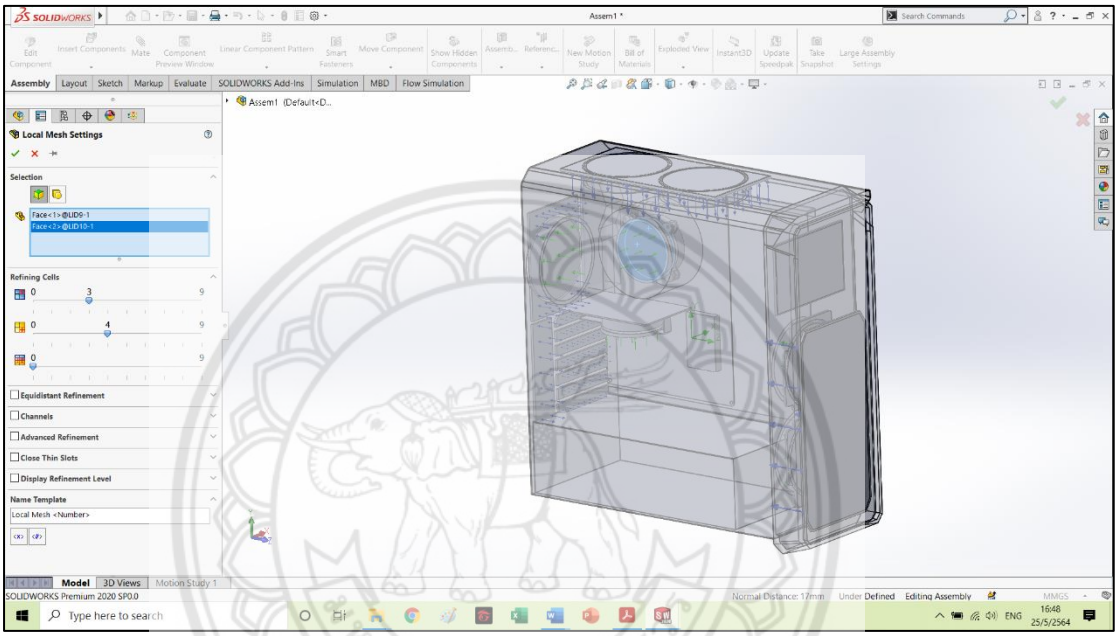
13.10 คลิกขวาที่คำสั่ง Mesh แล้วเลือก Insert Local Mesh



13.11 คลิกเลือกหน้าตัดพัดลม CPU ทั้งทางพัดอากาศเข้าและพัดออก

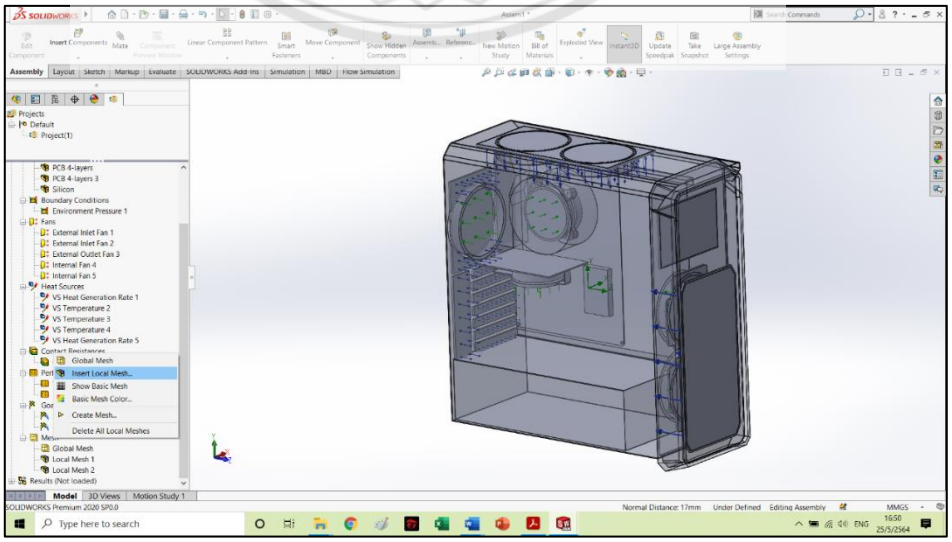
13.12 คลิกเช็คถูกตรง Channel ออก

13.13 ทำการปรับค่าในหัวข้อ Refining Cells โดยปรับค่า Level of Refining Fluid Cells เท่ากับ 3 และ Level of Refining Solid Cells เท่ากับ 4



13.14 คลิก OK

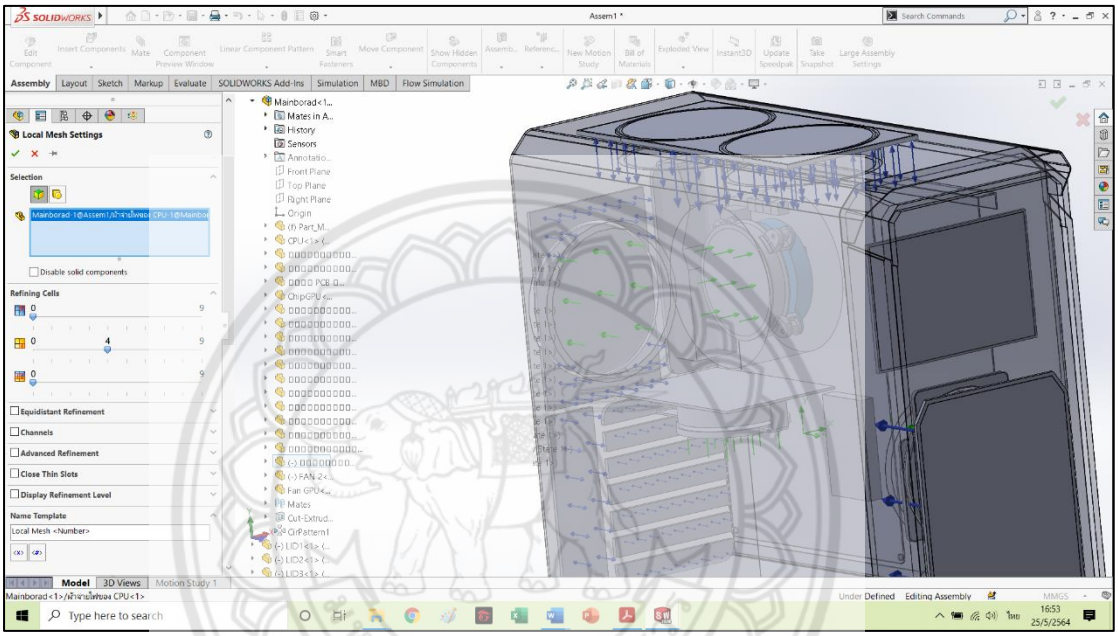
13.15 คลิกขวาที่คำสั่ง Mesh แล้วเลือก Inset Local Mesh



13.16 คลิกเลือกภาคจ่ายไฟของ CPU

13.17 คลิกเช็คถูกตรง Channel ออก

13.18 ทำการปรับค่าในหัวข้อ Refining Cells โดยปรับค่า Level of Refining Solid Cells เท่ากับ 4



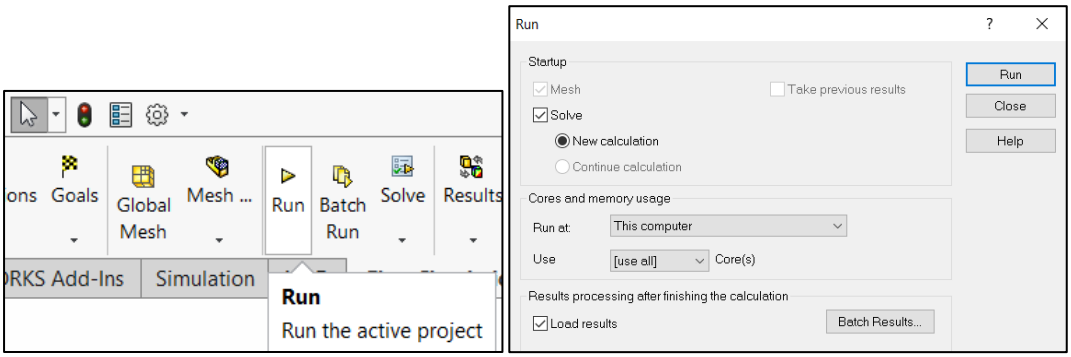
13.19 คลิก OK

14. วิธี Run การแสดงผลของแบบจำลอง

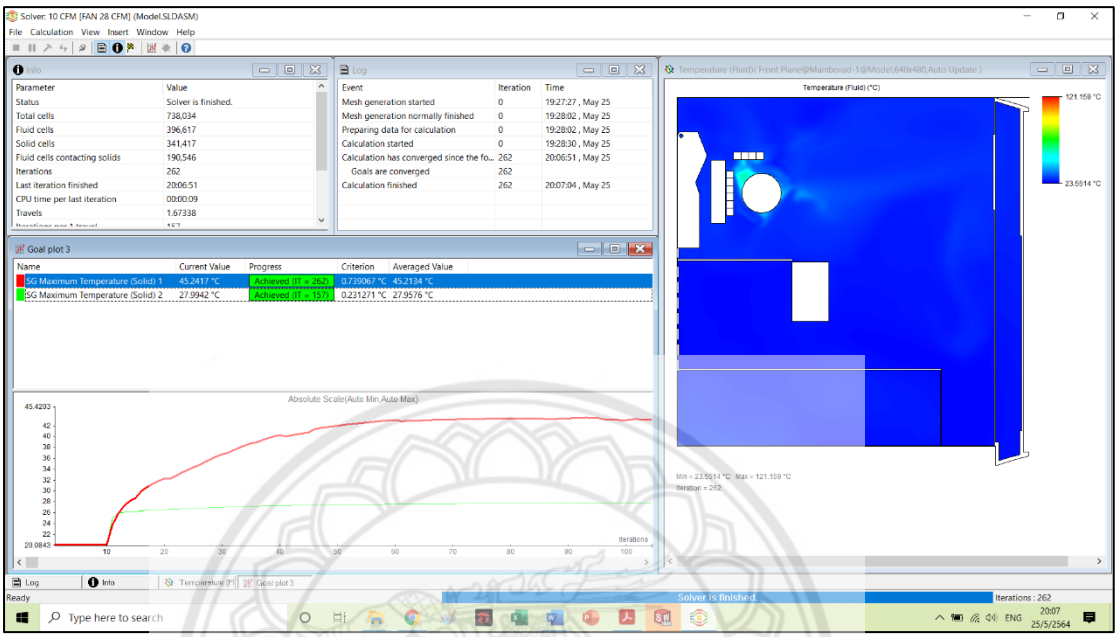
14.1 การ Run

14.1.1 คลิกคำสั่ง Run

14.1.2 เลือก Solve และเช็คถูกที่ New calculation จากนั้นคลิก Run



14.1.3 รอการ Calculation ของโปรแกรม

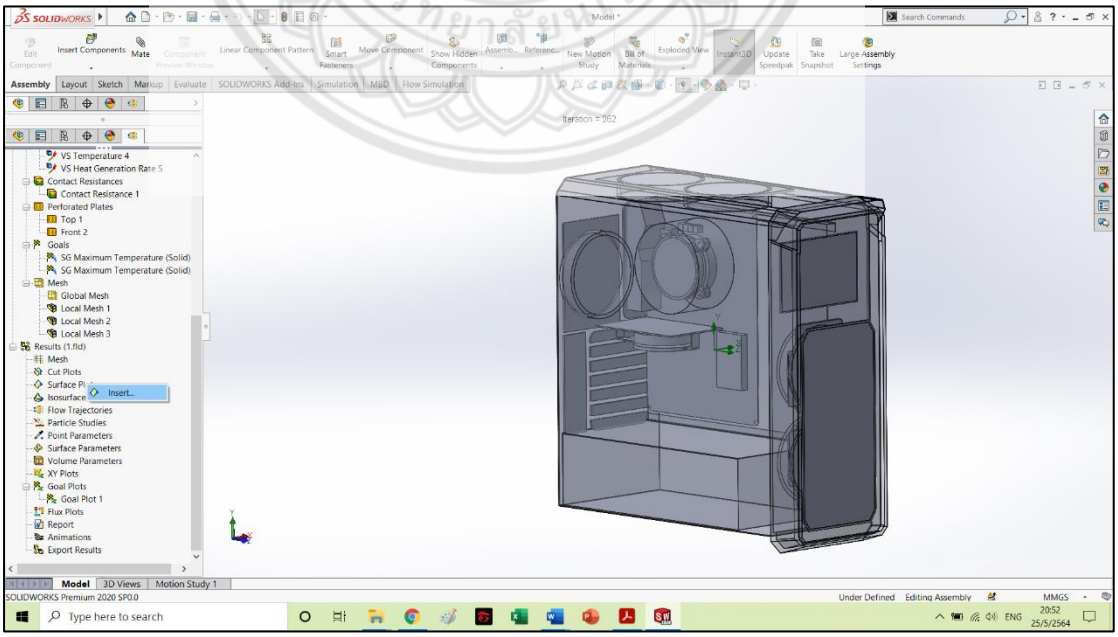


14.1.4 เมื่อ Run เสร็จแล้ว จะขึ้นข้อความว่า Solve Finish

14.2 การแสดงผลของอุณหภูมิ

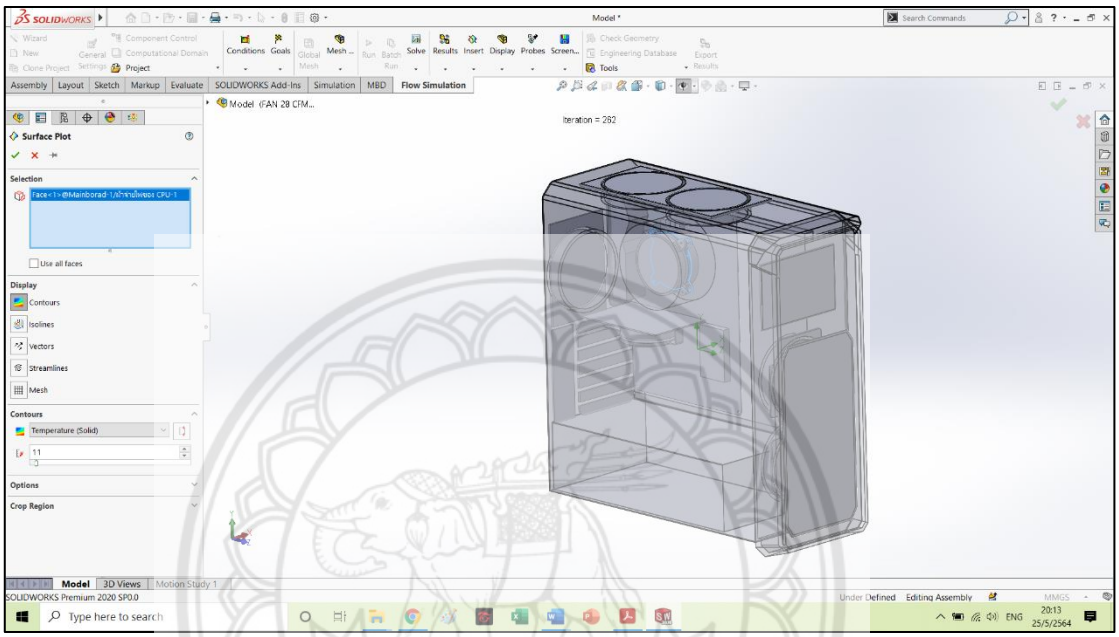
14.2.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Surface Plot

เลือก Insert

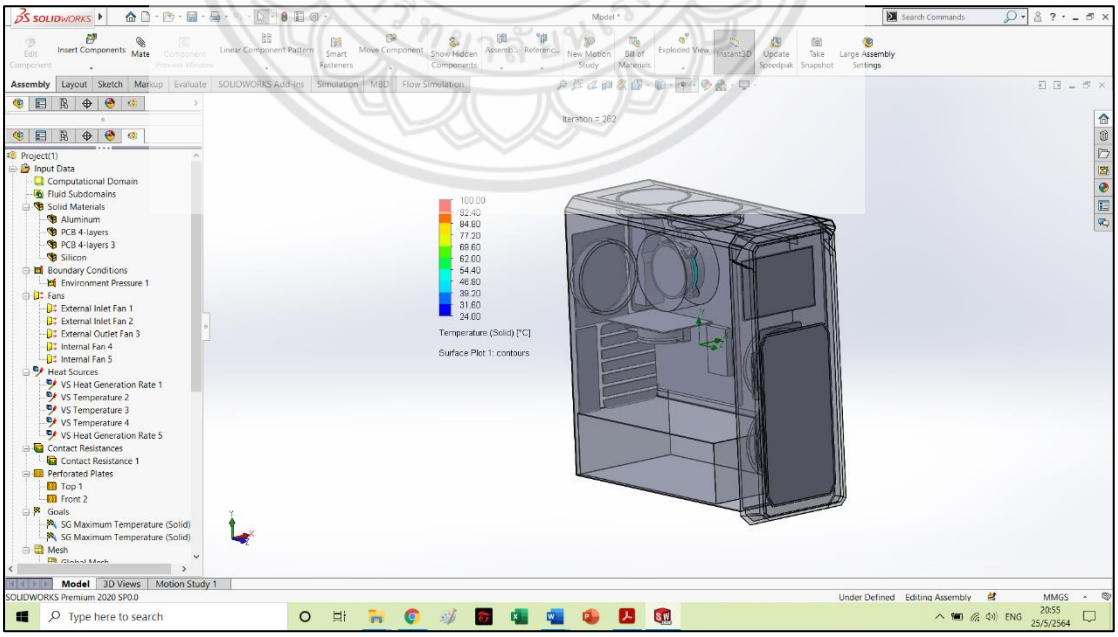


14.2.2 คลิกเลือกพื้นผิวภาคจ่ายไฟของ CPU

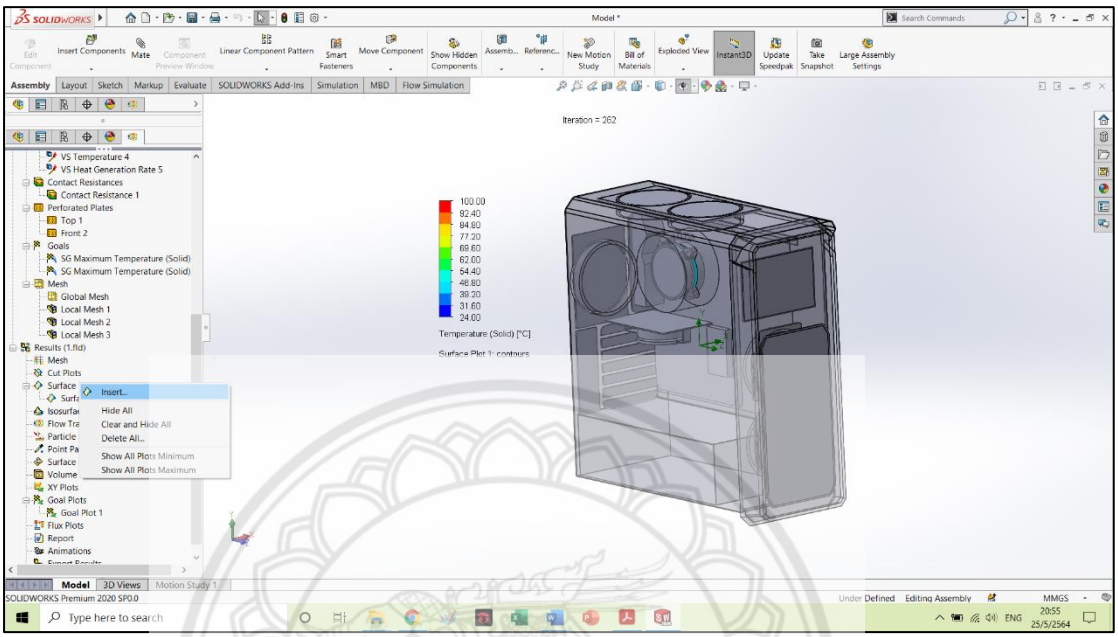
14.2.3 เลือกการแสดงผลแบบ Contours และการแสดงเป็น Temperature (Solid)



14.2.4 คลิก OK

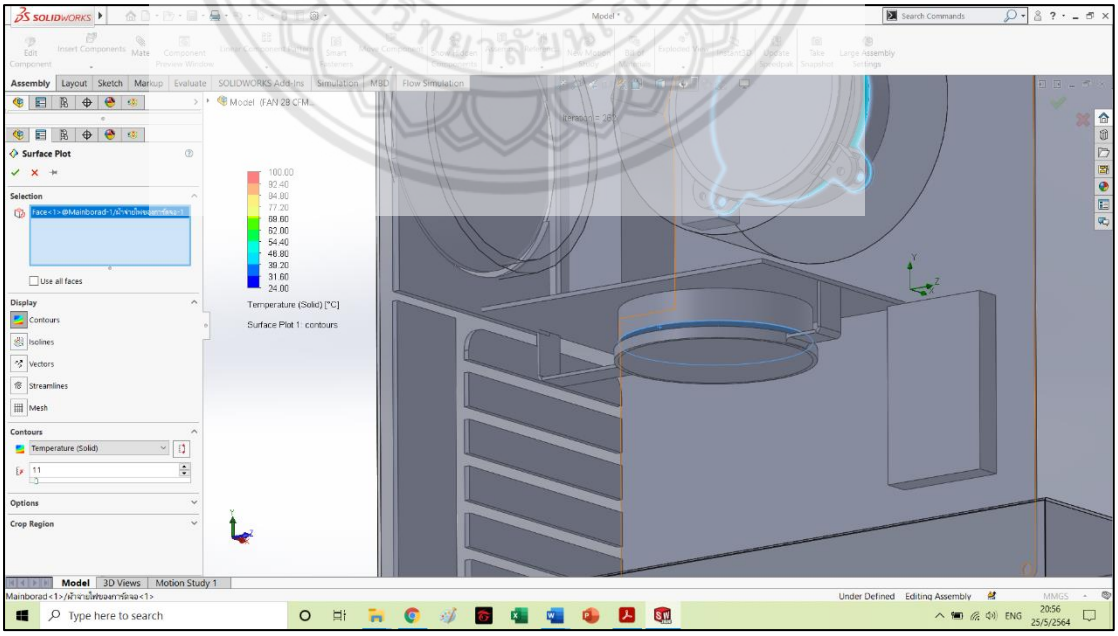


14.2.5 คลิกขวาที่คำสั่ง Surface Plot เลือก Insert

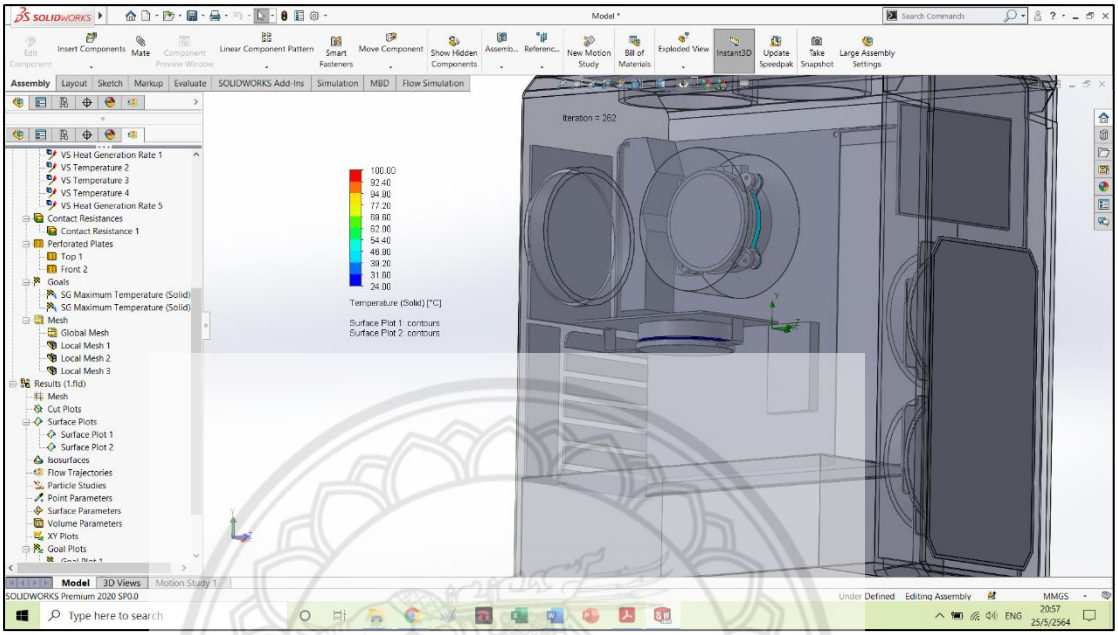


14.2.6 คลิกเลือกพื้นผิวภาคจ่ายไฟของการ์ดแสดงผล

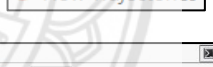
14.2.7 เลือกการแสดงผลแบบ Contours และการแสดงเป็น Temperature (Solid)



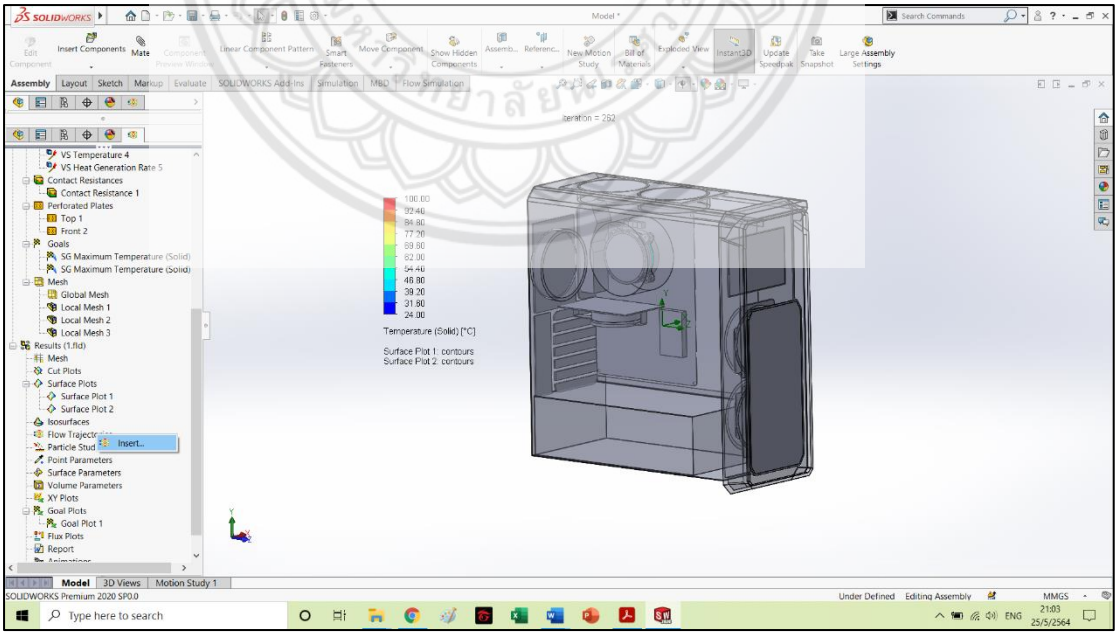
14.2.8 คลิก OK



14.3 การแสดงผลของลักษณะการไหลของกระแสลม

14.3.1 คลิกขวาที่คำสั่ง Flow Trajectories 

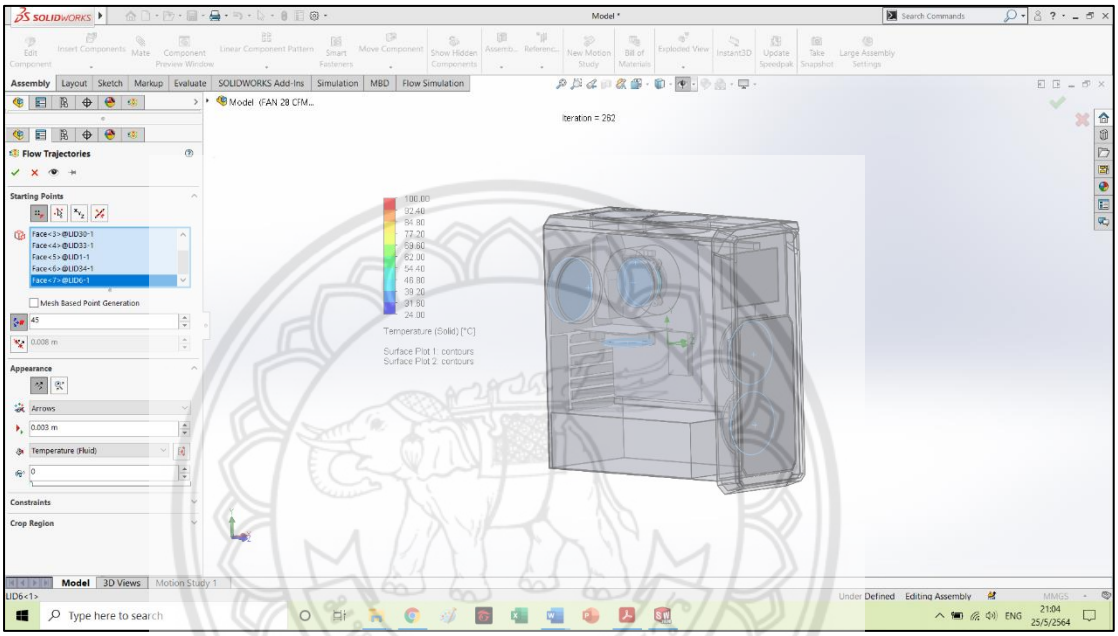
เลือก Insert



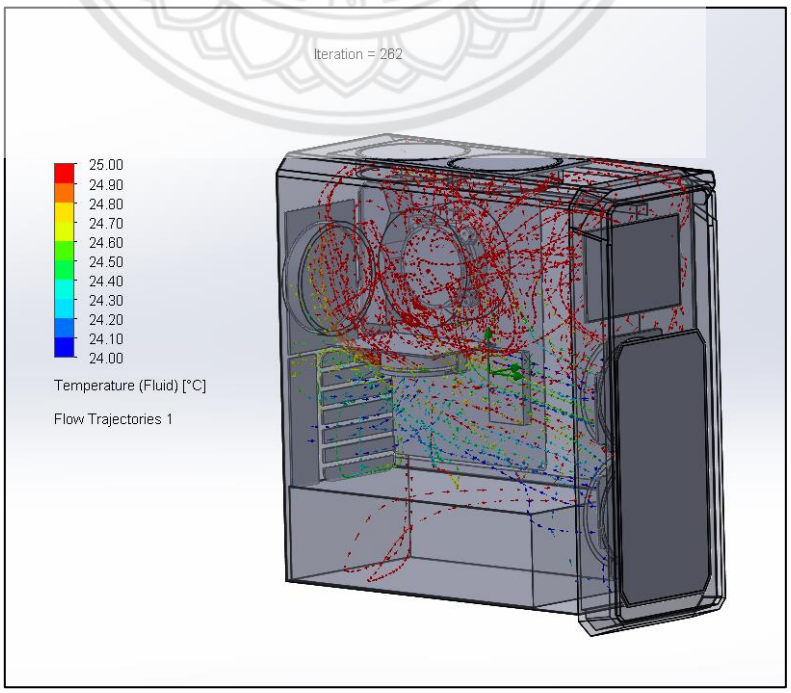
14.3.2 คลิกเลือก Lids พื้นที่หน้าตัดของพัดลม

14.3.3 เลือก Number of Points เป็น 45

14.3.4 เลือกลักษณะการไหลเป็นแบบ Arrows และเลือกการแสดงผลเป็น Temperature (Fluid)



14.3.5 คลิก OK



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.studocu.com