



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องพ่นสีเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า

Design and Development of a Spray Painting Machine for Alkalized Eggs Production Process

นามผู้วิจัย นายธีรชัย วิกข์โณคม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์กรรมมณฑ์ ชูประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสีทงี่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและพัฒนาเครื่องพ่นสีเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า

Design and Development of a Spray Painting Machine for Alkalized Eggs Production Process

โดย

นายธีรชัย วิจักข์ โณคม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธีรชัย วิจักข์ โฉม 2557: การออกแบบและพัฒนาเครื่องพ่นสีเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต
ไข่เยี่ยวม้า ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรม
เครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 224 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า
ต้นแบบขึ้น เพื่อให้มีอัตราการผลิตไข่เยี่ยวม้าที่สม่ำเสมอ และมีคุณภาพสีของไข่เยี่ยวม้าที่มีความ
สม่ำเสมอ รวมไปถึงช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานและลดมลภาวะทางอากาศ เนื่องจากการ
พ่นสีของสีให้กับทางผู้ประกอบการ โดยในการออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า
ได้มีการนำโปรแกรมในด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการวิเคราะห์การเกาะตัวของสี
บนเปลือกไข่ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า ซึ่งมีการ
ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยการใช้โปรแกรม
ทางด้านประมวลผลภาพ (Image Processing) เข้ามาช่วย และคำนวณความแข็งแรงของ
โครงสร้างหลักที่สำคัญด้วยกระบวนการวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าถูกออกแบบให้มีสถานีพ่นสีจำนวน 3 สถานี โดยแต่ละสถานีจะทำ
การพ่นสีไข่ 3 ด้าน ในแต่ละสถานีพ่นสีจะประกอบด้วย ชุดพ่นสีไข่ ชุดพลิกไข่ และชุดเป่าแห้งสี
ไข่จะถูกลำเลียงไปโดยสายพานลำเลียงซึ่งมีโซ่และ Roller เป็นส่วนประกอบ และขับเคลื่อนด้วย
มอเตอร์แบบมีเบรกพร้อมเกียร์ทดขนาด 90 W เครื่องที่ทำการออกแบบมีความยาวรวม 4 เมตร โดย
มีถาดรองรับไข่อยู่ที่ด้านท้ายเครื่อง ด้วยงบประมาณที่มีจำกัดจึงทำให้สามารถที่จะสร้างเครื่องได้
เพียงบางส่วน โดยเมื่อทำการสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าจนสมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้แล้ว เครื่อง
สามารถที่จะพ่นสีไข่เยี่ยวม้าได้ในอัตรา 20,000 ฟองต่อวัน และจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์
วิศวกรรมพบว่าเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ออกแบบมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1 ปี 11 เดือน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Theerachai Wiajckanodom 2014: Design and Development of a Spray Painting Machine for Alkalized Eggs Production Process. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 224 pages.

This research aims to design and develop a prototype of spray painting machine for alkalized egg production in order to have constant production rates with standard quality of alkalized eggs. This prototype can solve the shortage of labor problem and reduce pollution caused by exhalation of paint. Computational Fluid Dynamics program was used to analyze the best adhesion of paint on egg shells. The result obtained will be used to design spray painting machine. The computational results were also validated with the experimental results by using the Image Processing program. Moreover, the commercial Finite Element program was used to analyze the strength of the main structures and all important component parts of the machine.

The prototype of spray painting machine was designed to have 3 painting stations, each station consists of painting, turning and drying processes. The eggs are transported by chain conveyor with roller that driven by 90 W Compact AC Geared Motors with Electromagnetic Brake. The machine is 4 meter long with egg tray at the end of the machine. Due to the limited budget, the machine was built with only 1 painting station. From the final test, if this machine is complete, it will have the ability to paint egg at the production rate of 20,000 eggs per day. From the engineering economic analysis, it was found that this machine has approximately payback period of 1 years and 11 months.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก อาจารย์กรรมมันต์ ชูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผน
งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็น
ประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเพื่อน และพี่ ทุกคน ที่ได้มีส่วนในการให้คำแนะนำ ให้
งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไข่สงวนทรัพย์ ที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานและสนับสนุน
วัสดุคืบในการทดลองและข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณ สำนักงาน โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา ๒๕๕๔

ขอขอบคุณ บิดาและมารดา ที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้า ให้คำแนะนำ กำลังใจในการเรียนและ
การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ ในบริษัท มิกซ์เอ็น คอร์ปอเรชั่น จำกัด ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ
ให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ทั้งนี้หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขออภัยและกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ธีรชัย วิจักข โณดม

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (3) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | (8) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 38 |
| อุปกรณ์ | 38 |
| วิธีการ | 42 |
| ผลและวิจารณ์ | 51 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 123 |
| สรุป | 123 |
| ข้อเสนอแนะ | 124 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 126 |
| ภาคผนวก | 128 |
| ภาคผนวก ก ตารางผนวก | 129 |
| ภาคผนวก ข ภาพผนวก | 140 |
| ภาคผนวก ค แบบพิมพ์เขียวของเครื่องฟั่นสีไหมเย็บม้าต้นแบบ | 152 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 224 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| 1 | แสดงค่าความปลอดภัยที่แนะนำ | 18 |
| 2 | แสดงกลุ่มของการไหลแบบหลายเฟส | 33 |
| 3 | สถานะเงื่อนไขขอบเขต | 48 |
| 4 | ผลการทดสอบการเป่าแห้งสี | 79 |
| 5 | แรงจากน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยด้วยโปรแกรม SolidWorks | 90 |
| 6 | คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเครื่อง | 91 |
| | | |
| ตารางผนวกที่ | | |
| ก1 | ขนาดลิ้มมาตรฐานที่ใช้กับเพลานขนาดต่าง ๆ | 130 |
| ก2 | ตารางแนวทางในการเลือกอายุการใช้งานตลับลูกปืน | 131 |
| ก3 | ค่าตัวประกอบ X และ Y ของตลับลูกปืน | 132 |
| ก4 | ค่าแนะนำสำหรับค่าความปลอดภัยของแรงสถิต, s_0 | 132 |
| ก5 | โซ่โรลเลอร์ตามมาตรฐาน ISO/R 606-1976(E) ขนาดเป็น mm | 132 |
| ก6 | มวลของโซ่โรลเลอร์ต่อความยาว | 134 |
| ก7 | ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำสม่ำเสมอ | 135 |
| ก8 | ขนาดระบุของเพลามาตรฐานตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969 | 136 |
| ก9 | ค่าตัวประกอบความล้าของเพลาน | 136 |
| ก10 | เงื่อนไขการจับยึดแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ | 137 |
| ก11 | ชนิดของแรงกระทำที่กำหนดในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ | 138 |
| ก12 | ราคาประเมินของเครื่องฟั่นสีไข่เยี่ยวม้า | 139 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1 | เครื่องทำความสะอาดเปลือกไข่รุ่น Sani-Touch model 5s | 5 |
| 2 | เครื่องคัดแยกขนาดไข่รุ่น Sani-Touch Model CG | 5 |
| 3 | เครื่องฟั่นสีรุ่น GAM | 6 |
| 4 | รากฐานของเกลียว | 7 |
| 5 | ชนิดของอุปกรณ์ยึดด้วยเกลียว | 8 |
| 6 | หมวดเกลียวจักรกลลักษณะต่าง ๆ | 9 |
| 7 | หมวดเกลียวปรับลักษณะต่าง ๆ | 9 |
| 8 | ลักษณะการจับด้วยสายพาน (ก) โอเพ่นไดรฟ์ (ข) ครอสไดรฟ์ (ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (ง) มิวล์ไดรฟ์ (จ) แสดงการจับโดยใช้ล้อช่วย (ฉ) ริเวสไดรฟ์ | 14 |
| 9 | กระบวนการจัดเตรียมแบบจำลอง | 20 |
| 10 | กระบวนการวิเคราะห์ | 20 |
| 11 | การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ | 21 |
| 12 | กระบวนการและความผิดพลาด | 23 |
| 13 | รูปแบบของมวลที่เดินทางผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล | 24 |
| 14 | รูปแบบของแรงต่าง ๆ ในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ ไปกับการไหล | 25 |
| 15 | รูปแบบงานและพลังงานที่เกิดขึ้นในทิศแกน x ผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ ไปกับการไหล | 27 |
| 16 | กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid) | 31 |
| 17 | กริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructure Grid) | 31 |
| 18 | ภาพวงล้อสี (color wheel) | 36 |
| 19 | ปล่องลม สำหรับวัดความเร็วลม | 40 |
| 20 | ห้องฟั่นสีจำกัดแสง ขนาดกว้างยาวสูง $1 \times 1 \times 0.8$ m สำหรับใช้ในการทดลองฟั่นน้ำ ลงบนลูกเหล็กทรงกลม เพื่อนำผลที่ได้มาประเมินความถูกต้องของโปรแกรม | 40 |
| 21 | ลูกเหล็กทรงกลม สำหรับใช้ในการทดลองฟั่นสี | 41 |
| 22 | เครื่องมือชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องฟั่นสีไข่เยี่ยวม้า | 41 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 23 | แผนผังวิธีการวิจัย | 42 |
| 24 | แบบจำลองสองมิติของการพ่นน้ำลงบนลูกเหล็กทรงกลม | 46 |
| 25 | แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติ (a) และขอบเขตของกรอบการพ่นน้ำ (b) | 47 |
| 26 | การพ่นสีไข่มุกที่เชื่อมมาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยกำหนดดองสาของหัวสเปรย์เป็น 45 60 และ 90 องศาตามลำดับโดยอ้างอิงจากแนวแกนนอน | 49 |
| 27 | แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติของการพ่นสีไข่มุกในมุมที่แตกต่างกัน | 49 |
| 28 | ตะแกรงสำหรับวางไข่มุกเพื่อพ่นสี | 51 |
| 29 | การคำนวณหาบริเวณที่ถูกพ่นน้ำในรูปของมุม θ | 54 |
| 30 | ลูกเหล็กหลังจากพ่นน้ำ | 54 |
| 31 | ภาพลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วในระบบสี RGB (ด้านซ้าย) ระบบสี HSV (ด้านขวา) | 55 |
| 32 | ภาพลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วในระบบสี HSV หลังจากตัดพื้นหลังออกเป็นสีดำ (ด้านซ้าย) ภาพบริเวณที่โดนพ่นน้ำโดยสมบูรณ์ (ด้านขวา) | 56 |
| 33 | การเกาะตัวของน้ำที่ลูกเหล็กจากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ | 56 |
| 34 | การเกาะตัวของสีบนเปลือกไข่มุกจากการจำลองการพ่นสีไข่มุกที่ห้องสาของหัวสเปรย์ต่าง ๆ | 57 |
| 35 | การแบ่งพื้นที่พ่นสีบริเวณเปลือกไข่มุกเป็นส่วน ๆ เพื่อให้พ่นสีไข่มุกได้ครบทั้งฟอง | 58 |
| 36 | ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพ่นสีไข่มุกจากการประเมินการจำลองการพ่นสี | 59 |
| 37 | ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพ่นสีไข่มุกที่ออกแบบใหม่เพื่อลดขนาดของเครื่อง | 59 |
| 38 | การทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์จำนวน 2 ตัวพร้อมกันจากด้านซ้ายและด้านขวา | 60 |
| 39 | ผลการทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์จำนวน 2 ตัวพร้อมกันจากด้านซ้ายและด้านขวา | 61 |
| 40 | การทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์ตัวเดียวเคลื่อนที่ไปและกลับจากด้านซ้ายไปขวา | 61 |
| 41 | ผลการทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์ตัวเดียวเคลื่อนที่ไปและกลับจากด้านซ้ายไปขวา | 62 |
| 42 | การทำงานของชุดพ่นสีในเครื่องพ่นสีไข่มุก | 62 |
| 43 | ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดพ่นสีในเครื่องพ่นสีไข่มุก | 63 |
| 44 | กลไกการพ่นสีด้านหัวสเปรย์ | 64 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 45 | การหมุนไขเพื่อที่จะฟันสีด้านต่อไป | 65 |
| 46 | ชุดพลิกไข | 66 |
| 47 | การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของไขด้วยโปรแกรม SolidWorks | 68 |
| 48 | ทิศทางของแรงจากน้ำหนักของไขที่กระทำกับตลับลูกปืนของ Roller | 71 |
| 49 | ทิศทางของแรงจากการกดของลูกยางที่กระทำกับตลับลูกปืนของ Roller | 71 |
| 50 | แสดงระยะห่างระหว่างลูกยาง ครอบกลมสำหรับกดลูกยาง และจุดหมุน | 73 |
| 51 | การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของชุดลูกยางด้วยโปรแกรม SolidWorks | 75 |
| 52 | แบบจำลองสามมิติของชุดลูกยางด้วยโปรแกรม SolidWorks | 76 |
| 53 | การสร้างแบบจำลองสามมิติของชุดเป่าแห้งสีด้วยโปรแกรม SolidWorks | 82 |
| 54 | การออกแบบความกว้างของสายพานลำเลียง | 83 |
| 55 | การขับสายพาน โดยมอเตอร์ไฟฟ้า | 86 |
| 56 | การสร้างแบบจำลองสามมิติของสายพานลำเลียงด้วยโปรแกรม SolidWorks | 89 |
| 57 | การหาน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม SolidWorks | 90 |
| 58 | การกำหนดตำแหน่งแรงกระทำและจุดยึดบน โครงสร้างหลัก | 92 |
| 59 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดฟันสีไขบน โครงสร้างหลัก | 92 |
| 60 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดเป่าแห้งสีบน โครงสร้างหลัก | 93 |
| 61 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดพลิกไขบน โครงสร้างหลัก | 93 |
| 62 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของสายพานและไขบน โครงสร้างหลัก | 94 |
| 63 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดมอเตอร์ไฟฟ้าบน โครงสร้างหลัก | 94 |
| 64 | ผลของการแบ่งเอลิเมนต์ที่โครงสร้างหลักของสายพาน | 95 |
| 65 | ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นที่โครงสร้างหลักของสายพาน | 96 |
| 66 | ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของโครงสร้างหลักของสายพาน | 97 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 67 | ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของโครงสร้างหลักของสายพาน | 97 |
| 68 | การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนัก (ลูกครีไฟฟ้า) และจุกยึดบนโครงสร้างหลัก | 98 |
| 69 | ผลของการแบ่งเอลิเมนต์พื้นฐานรองชุดสายพานลำเลียง | 99 |
| 70 | ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นของฐานรองชุดสายพาน | 100 |
| 71 | ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของฐานรองชุดสายพาน | 101 |
| 72 | ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของฐานรองชุดสายพาน | 101 |
| 73 | ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้าที่จะดำเนินการสร้าง | 103 |
| 74 | ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพ่นสีไข่ | 104 |
| 75 | ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพลิกไข่ | 105 |
| 76 | ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดเป่าแห้งสี | 106 |
| 77 | ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดสายพานลำเลียง | 107 |
| 78 | เครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้าที่จะดำเนินการสร้างบางส่วน | 108 |
| 79 | เครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้าที่จะดำเนินการสร้าง | 109 |
| 80 | ผลการสร้างชุดพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้า | 109 |
| 81 | ชุดหัวสเปร์ยของชุดพ่นสี | 110 |
| 82 | ลิมิตสวิตช์และ Stopper ของชุดพ่นสี | 110 |
| 83 | ผลการสร้างชุดพลิกไข่ของเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้า | 111 |
| 84 | ผลการสร้างชุดพลิกไข่ของเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้า | 111 |
| 85 | ผลการสร้างสายพานลำเลียงและถาดรองไข่ออก | 112 |
| 86 | มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง | 112 |
| 87 | อุปกรณ์ลมที่ใช้ควบคุมการจ่ายลมให้กับชุดพ่นสีและชุดพลิกไข่ | 113 |
| 88 | ตู้แผงวงจรไฟฟ้า | 113 |
| 89 | ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า | 114 |
| 90 | การแก้ไขปัญหาการเคลื่อนที่ของไข่โดยการใส่ยางกลมที่ Roller | 115 |
| 91 | ไข่หลังจากออกจากชุดเป่าแห้งสี | 116 |
| 92 | ไข่หลังจากพ่นสีด้วยเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมม้าต้นแบบ | 116 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|------------|--|------|
| 93 | การทำงานของเครื่องพ่นสีไข่อีเอ็มว้าต้นแบบที่ออกแบบใหม่ | 118 |
| 94 | การเกาะตัวของสีที่ Roller และตัวเครื่อง | 119 |
| | | |
| ภาพผนวกที่ | | |
| ข1 | คุณสมบัติของโซลินอยด์วาล์ว 5/2 และ 5/3 ทาง | 141 |
| ข2 | คุณสมบัติของโซลินอยด์วาล์ว 3/2 ทาง | 142 |
| ข3 | คุณสมบัติของกระบอกลมรุ่น MI | 143 |
| ข4 | คุณสมบัติของกระบอกลมรุ่น MAL | 144 |
| ข5 | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพาน | 144 |
| ข6 | คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบมีเบรก | 145 |
| ข7 | Pneumatic Diagram ของเครื่องพ่นสีไข่อีเอ็มว้า 1 สถานีพ่นสี | 147 |
| ข8 | รายละเอียดขนาดโซ่โรลเลอร์ | 148 |
| ข9 | แผนภูมิใช้เลือกโซ่โรลเลอร์แบบ B (สำหรับพีเนียน 19 ฟัน) | 149 |
| ข10 | แผนภูมิใช้เลือกโซ่โรลเลอร์แบบ A (สำหรับพีเนียน 15 ฟัน) | 150 |
| ข11 | แผนภูมิใช้เลือกโซ่โรลเลอร์แบบ A (สำหรับพีเนียน 19 ฟัน) | 151 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|---|---|--|
| σ_{cd} | = | ความเค้นออกแบบ |
| σ_y | = | ค่าความต้านทานแรงดึงคราก |
| σ_u | = | ค่าความต้านทานแรงดึงอัลติเมต |
| σ_d | = | ความเค้นใช้งานที่ใช้ในการออกแบบ |
| $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ | = | ค่า Prandtl number ของ k และ ϵ ตามลำดับ |
| α | = | ความเร่งเชิงมุม |
| θ | = | มุมในหน่วย <i>rad</i> |
| τ_d | = | ความเค้นเฉือนออกแบบ |
| τ | = | ความเค้นเฉือน |
| μ | = | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตลับลูกปืน |
| μ_t | = | ความหนืดหมุนวน |
| ω | = | ความเร็วเชิงมุม |
| ω_2 | = | ความเร็วเชิงมุมสุดท้าย |
| ω_1 | = | ความเร็วเชิงมุมเริ่มต้น |
| b | = | ความกว้างของลิ้ม |
| C | = | แรงพลวัตประเมิน |
| C | = | ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองโซ่ |
| C_0 | = | แรงสถิตประเมิน |
| C_m | = | ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการตัด |
| C_t | = | ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด |
| CAD | = | Computer Aided Design |
| $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ | = | ค่าคงที่ |
| C_μ | = | ค่าคงที่ |
| CFD | = | Computational Fluid Dynamics หรือพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ |
| <i>cfm</i> | = | ปริมาณลม |
| D, d | = | เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ |
| D_2, d_2 | = | เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเกลิยว |
| D_p, d_1 | = | เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย |
| d | = | เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | | |
|----------|---|--|
| DRW | = | Discrete Random Walk |
| DP | = | ค่าเสื่อมราคา |
| dv | = | ผลต่างของความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย |
| dt | = | ผลต่างของเวลาที่ความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย |
| e | = | ประสิทธิภาพในการถ่ายทอดกำลัง |
| F_r | = | แรงกระทำในแนวรัศมี |
| F_a | = | แรงกระทำในแนวแกนหรือแรงรุน |
| F_t | = | แรงในแนวเส้นสัมผัส |
| F | = | แรงต้านจากความเสียดทานของตลับลูกปืน |
| G_k | = | พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย |
| G_b | = | พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว (Buoyancy) |
| g | = | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง |
| H | = | ความสูงของสามเหลี่ยมมุมฐาน |
| h | = | ความหนาของลิม |
| H | = | hue หรือค่าโทนสี |
| I | = | intensity หรือค่าความอึมตัว |
| I | = | โมเมนต์ความเฉื่อย |
| I | = | กระแสไฟฟ้า |
| I | = | ค่าเสียโอกาสต่อปี |
| i | = | อัตราดอกเบี้ยต่อปี |
| l | = | ความยาวของลิม |
| L_{10} | = | อายุการใช้งานประเมิน เป็นจำนวนล้านรอบ |
| L | = | อายุการใช้งานของเครื่อง |
| M | = | โมเมนต์ตัด |
| M | = | น้ำหนัก |
| N | = | ค่าความปลอดภัย |
| n | = | ความถี่รอบของเฟืองโซ่ |
| N_s | = | ตัวประกอบใช้งาน |
| n_1 | = | ความถี่รอบของเพลารอบต่ำ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | | |
|-------|---|---|
| n_2 | = | ความเร็วรอบของเพลารอบสูง |
| N | = | แรงที่กระทำกับตลับลูกปืน |
| P | = | ระยะพิตช์ |
| P | = | แรงพลวัตของตลับลูกปืน (equivalent dynamic bearing load) |
| p | = | เลขยกกำลังของสมการอายุการใช้งาน |
| P | = | แรงสมมูลที่กระทำต่อตลับลูกปืน |
| P_0 | = | แรงสถิตสมมูล |
| P | = | กำลังที่ใช้ในการเลือกโซ่ |
| P | = | พลังงานไฟฟ้า |
| P | = | ราคาซื้อของเครื่องจักร |
| q_s | = | พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ (btuh) |
| r | = | รัศมี |
| s_0 | = | ค่าความปลอดภัยสำหรับแรงสถิต |
| S | = | saturation หรือค่าความสว่าง |
| s | = | ระยะกระจัดในแนวรัศมี |
| S | = | ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ |
| T | = | แรงบิด |
| t | = | เวลา |
| t_2 | = | อุณหภูมิอากาศที่ต้องการ |
| t_1 | = | อุณหภูมิอากาศที่ขาเข้า |
| v | = | ความเร็วรอบของเฟืองโซ่ |
| V | = | แรงดันไฟฟ้า |
| W_p | = | กำลังงาน |
| X | = | ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี |
| x | = | จำนวนข้อโซ่หรือจำนวนพิตช์ของโซ่ |
| Y | = | ตัวประกอบแรงรุน |
| Y_M | = | ค่าการกดอัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล |
| z | = | จำนวนฟันของเฟืองโซ่ |
| z | = | จำนวนฟันบนพีเนียน |

การออกแบบและพัฒนาเครื่องพ่นสีเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า

Design and Development of a Spray Painting Machine for Alkalized Eggs Production Processes

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชาชนส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรกว่าครึ่งของประเทศ (34 ล้านคน) คิดเป็นร้อยละ 55.7 ของประชากรทั้งประเทศ (2545) การเลี้ยงสัตว์นับว่าเป็นอาชีพที่คืออย่างหนึ่งของเกษตรกร สามารถเลี้ยงเป็นจำนวนมากเพื่อใช้เป็นอาชีพหลักหรือเลี้ยงจำนวนไม่มากเพื่อเป็นอาชีพเสริมก็ได้ โดยการเลี้ยงไก่และเป็ดเพื่อจำหน่ายไข่นั้นเป็นอาชีพที่เกษตรกรทำกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไข่เป็นอาหาร โปรตีนสำคัญที่มีราคาถูกหาได้ง่าย ไข่จึงกลายเป็นอาหารประจำถิ่นของประชากรเกือบทุกประเทศทั่วโลก นอกเหนือจากสารอาหารโปรตีนที่เป็นหนึ่งในสารอาหารจำเป็นต่อร่างกายอย่างยิ่งแล้ว ไข่ยังมีสารอาหารอื่น ๆ อีกมากมาย โดยเฉพาะไข่เป็ดเป็นแหล่งอาหารที่ให้โปรตีนสูงและนำมาประกอบอาหารได้หลากหลายวิธี แต่ไข่เป็ดที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ทำให้ต้องหาวิธีการเพิ่มมูลค่าโดยการแปรรูปไข่ ทำให้มีระยะเวลาในการเก็บรักษาที่ยาวนานกว่าและสามารถขายได้ในราคาที่สูงกว่า (อ้างอิงจากราคาตลาด) ซึ่งหนึ่งในวิธีการแปรรูปที่ทำให้สามารถเก็บรักษาได้นานคือการแปรรูปเป็นไข่เยี่ยวม้า

ไข่เยี่ยวม้าเป็นการแปรรูปไข่โดยการใช้กรรมวิธีทำให้เป็นด่างถือว่าเป็นการถนอมอาหารรูปแบบหนึ่ง สามารถทำได้กับไข่เป็ด ไข่ไก่ และไข่นกกระทา หนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าคือการพ่นสีบริเวณเปลือกไข่เยี่ยวม้า นอกจากเพื่อเพิ่มความสวยงามแล้วการพ่นสียังช่วยรักษาค่าความเป็นกรดด่างของไข่เยี่ยวม้าในระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง ทำให้คุณภาพของไข่เยี่ยวม้าไม่เปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตแบบเดิมทำให้ได้อัตราการผลิตต่อวันไม่สม่ำเสมอ โดยขั้นตอนการพ่นสีเปลือกไข่เยี่ยวม้าแบบเดิมนั้นคนงานจะพ่นสีแล้วทิ้งไว้เพื่อรอให้แห้ง พบว่าช่วงฤดูร้อนอากาศจะแห้งทำให้ไข่เยี่ยวม้าที่ถูกพ่นสีจะแห้งเร็วกว่าในช่วงฤดูฝน เพราะช่วงฤดูฝนมีปริมาณไอน้ำในอากาศมากทำให้ต้องใช้เวลานานในการรอให้เปลือกไข่ที่พ่นสีแห้งสนิทเป็นสาเหตุให้ได้อัตราการผลิตต่อวันไม่เพียงพอต่อความต้องการ อีกทั้งการใช้แรงงานคนในการพ่นสีทำให้คุณภาพการพ่นสีของไข่แต่ละฟองไม่เท่ากัน นอกจากนี้ใน

กระบวนการผันสีเปลือกไข่แบบเดิมจะเกิดการฟุ้งกระจายของละอองสี ซึ่งเป็นอันตรายหากสูดดมเข้าไปในปริมาณมาก

จึงมีแนวคิดที่จะศึกษา ค้นคว้าและพัฒนาสร้างเครื่องผันสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบที่สามารถเป่าสีให้แห้งขึ้น เพื่อให้สามารถผลิตไข่เยี่ยวม้าได้เพียงพอต่อความต้องการ โดยมีอัตราการผลิตที่สม่ำเสมอ เพิ่มคุณภาพของไข่เยี่ยวม้า เมื่อมีการพัฒนาต่อยอดก็สามารถที่จะจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ช่วยเหลือเกษตรกรที่มีเงินทุนน้อยและช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานได้

เครื่องผันสีไข่เยี่ยวม้าเป็นการนำเทคโนโลยีทางวิศวกรรมมาศาสตร์ประยุกต์ใช้กับการเกษตร เพื่อการเพิ่มขีดความสามารถด้านการผลิตและเพิ่มคุณภาพของผลผลิตให้ได้มาตรฐาน ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นและผู้บริโภคได้รับสินค้าที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น เป็นการกระตุ้นให้ภาคการเกษตรหันมาสนใจที่จะศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเกษตรที่หลากหลายขึ้นมาเพื่อเพิ่มผลผลิตและพัฒนาคุณภาพให้ทัดเทียมกับนานาประเทศมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวทางธุรกิจ จากธุรกิจชุมชนขนาดเล็ก ขนาดกลาง สามารถพัฒนาไปเป็นธุรกิจขนาดใหญ่ได้

เมื่อเครื่องผันสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบสร้างเสร็จก็สามารถที่จะพัฒนาและปรับปรุงเครื่องรุ่นต่อๆ ไปให้เหมาะสมกับความต้องการของแต่ละธุรกิจ และพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ด้วยราคาที่เหมาะสมแก่ผู้ประกอบการแปรรูปไข่เป็ดได้ทั่วประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าและเก็บข้อมูลหลักการทำงานของเครื่องพ่นสีที่ใช้ในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าทั้งในและนอกประเทศ
2. เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ ออกแบบ และพัฒนาเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบที่มีระบบทำให้สีบนเปลือกไข่แห้งสนิท
3. ศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการพ่นสีด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD และความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องด้วยโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมถึงวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการสร้างเครื่อง
4. เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องล้างไข่เปิดต้นแบบ ประเมินผลเบื้องต้นและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นก่อนนำไปใช้งานจริง

การตรวจเอกสาร

การแปรรูปผลิตภัณฑ์จากไข่เป็ดเป็นไข่เยี่ยวม้า

ไข่เยี่ยวม้าหรือไข่สำเภาก็เป็นการแปรรูปไข่เพื่อการบริโภคในรูปแบบหนึ่งของคนจีนที่มีมาแต่โบราณกาล โดยการใช้กรรมวิธีทำให้เป็นค้างซึ่งเป็นวิธีการถนอมอาหารรูปแบบหนึ่ง สามารถทำได้ทั้งกับไข่เป็ด ไข่ไก่ และไข่นกกระทา โดยนำไข่ไปแช่หรือหมักในส่วนผสมที่มาจาก ปูนขาว, เกลือ, โซเดียมคาร์บอเนต, โบซาคำ, ซิงค์ออกไซด์ และน้ำ ซึ่งใช้เวลาในการหมักประมาณ 10-15 วัน จนมีค่า pH ของไข่เพิ่มขึ้นเป็น 9-12 ทำให้ไข่ขาวมีลักษณะเป็นวุ้น เนื่องจากการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (protein denaturation) มีสีน้ำตาลไหม้หรือสีชาเข้มและไข่แดงเป็นยางมะตูม ไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม สามารถเก็บไว้ได้ไม่ต่ำกว่า 6 เดือนและเก็บในที่เย็นไว้ได้นานถึง 1 ปี โดยไม่เสื่อมคุณภาพ

ในการทำไข่เยี่ยวม้าโปรตีนและฟอสโฟไลปิด (phospholipids) ในไข่บางส่วนจะสลายตัวทำให้เกิดแอมโมเนีย นอกจากนี้ไขมันในไข่แดง (yolk fat) ก็ลดน้อยลงไปด้วย ได้มีการศึกษาเรื่องการทำไข่เยี่ยวม้าว่า ในกระบวนการทำไข่เยี่ยวม้านั้น หากไข่ที่ใช้มีเชื้อ Salmonella ซึ่งเป็นเชื้อโรคทำให้เกิดท้องร่วง ท้องเสีย หรือเชื้อโรคจำพวกพาราไทฟอยด์อยู่เมื่อทำเป็นไข่เยี่ยวม้าได้แล้วเชื้อนี้จะตายไป ในการทำไข่เยี่ยวม้านั้น น้ำในไข่จะถูกดูดซึมออกมาจากไข่ ซึ่งจะมีผลให้สารอาหารต่างๆ ในไข่มีความเข้มข้นมากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันดัง เกลือ และสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้จะเข้าไปในเนื้อไข่และทำให้เกิดการย่อยสลายโปรตีนบางส่วน การทำลายกรดอะมิโนบางตัว การย่อยสลายไขมันบางส่วน การทำลายสารอาหารบางชนิด การเพิ่มปริมาณโซเดียม แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมแล้วคุณค่าทางอาหารของไข่เยี่ยวม้าจะไม่แตกต่างจากไข่สดมากนัก

เครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไข่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

จากการสำรวจข้อมูลของเครื่องจักรที่ใช้ในการฟนสีไข่เยี่ยวม้าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยังไม่พบว่ามีผู้ใดผลิตหรือจำหน่ายเครื่องจักรที่ใช้ในการฟนสีไข่เยี่ยวม้ามาก่อน จึงได้ทำการสำรวจข้อมูลของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไข่และการฟนสีแทน

National Poultry Equipment Company (2008) เป็นบริษัทของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผู้ผลิตอุปกรณ์และเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไข่สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

ขนาดเล็กและขนาดกลาง ตัวอย่างเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไข่ เช่น เครื่องจักรรุ่น sani-touch model 5s เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการทำความสะอาดเปลือกไข่ ซึ่งมีอัตราการผลิตที่ 1800-2520 ฟองต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องทำความสะอาดเปลือกไข่อุ่น Sani-Touch model 5s

ที่มา: National Poultry Equipment Company (2008)

เครื่องจักรรุ่น Sani-Touch Model CG เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการคัดแยกขนาดของไข่ โดยมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 7200-8640 ฟองต่อชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เครื่องคัดแยกขนาดไข่อุ่น Sani-Touch Model CG

ที่มา: National Poultry Equipment Company (2008)

Fu Shing Engineering Company (2010) เป็นบริษัทสัญชาติจีน ซึ่งเป็นผู้ผลิตเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการพ่นสีชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป ตัวอย่างเครื่องจักรที่ใช้ในการพ่นสี คือ เครื่องจักรรุ่น GAM เป็นเครื่องจักรที่ใช้พ่นสีรอบชิ้นงาน หลักการทำงานของเครื่องคือให้ชิ้นงานหมุนอยู่กับที่และปืนพ่นสีอัตโนมัติเคลื่อนที่ไปและกลับเพื่อพ่นสีไปทั่วชิ้นงาน โดยที่การพ่นสีขา กลับและขากลับปืนพ่นสีอัตโนมัติจะอยู่ในมุมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องพ่นสีรุ่น GAM

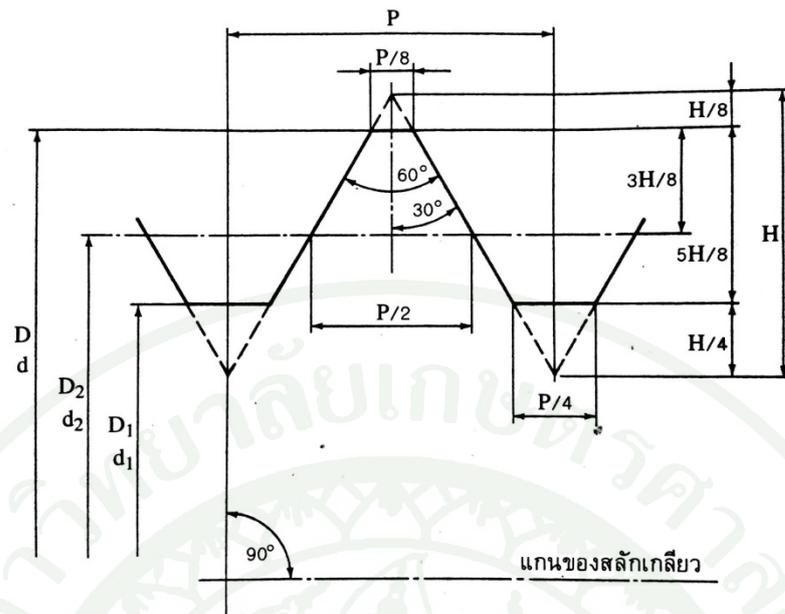
ที่มา: Fu Shing Engineering Company (2010)

ทฤษฎีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

1. การยึดด้วยสลักเกลียว

การเลือกวิธีการยึดและตำแหน่งยึดมีความสำคัญมาก และการยึดจะต้องมีให้อุปกรณ์ยึดอยู่ภายใต้แรงตึง แต่ควรให้อยู่ภายใต้แรงดึงและแรงเฉือน หรือถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องอยู่ภายใต้แรงตึงก็จะต้องพยายามทำให้แรงตึงกระทำน้อยที่สุด โดยใช้อุปกรณ์อื่นเข้ามาช่วยลดแรงกระทำ

1.1 แบบของเกลียว เพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนชิ้นส่วนของรอยต่อด้วยสลักเกลียว องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) จึงได้กำหนดมาตรฐานของสลักเกลียวเป็นหน่วยระหว่างประเทศขึ้น ลักษณะเกลียวสำหรับใช้งานทั่วไปตามมาตรฐานระหว่างประเทศ ISO/R 68-1969 (E) มีแบบรากฐานของเกลียว ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 รากฐานของเกลียว

ที่มา: วรวิทย์ และ ชาญ (2545)

เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ (D, d) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตที่สุดของเกลียว การบอกขนาดเกลียวมักจะบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เป็นขนาดระบุ (Nominal Size) ของเกลียว สัญลักษณ์ที่ใช้ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่หมายถึงขนาดของเกลียวใน อักษรตัวพิมพ์เล็กหมายถึงขนาดของเกลียวนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ของเกลียว (D_2, d_2) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กับเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยของเกลียว

เส้นผ่านศูนย์กลางน้อย (D_1, d_1) เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดของเกลียว หรืออาจเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางโคนเกลียว

ระยะพิตซ์ (P) เป็นระยะที่วัดตามแนวแกนของเกลียวจากจุดจุดหนึ่งบนเกลียวหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่สมนัยกันบนอีกเกลียวหนึ่ง

ความสูงของสามเหลี่ยมมุมฐาน (H) เป็นระยะที่วัดตั้งฉากกับแกนของเกลียวจากโคนเกลียวถึงยอดเกลียว ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสามเหลี่ยมมุมฐานกับระยะพิตซ์คือ

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2}P = 0.8660254P \quad (1)$$

1.2 ชนิดของอุปกรณ์ยึดด้วยเกลียว การแบ่งชนิดของอุปกรณ์ยึดด้วยเกลียวแบ่งตามวิธีการที่ใช้จับยึด สามารถจำแนกได้ดังนี้

1.2.1 สลักเกลียวและแป้นเกลียว (Bolt and Nut)

1.2.2 หมุดเกลียว (Cap Screw)

1.2.3 สลักเกลียวสตัด (Stud Bolt)

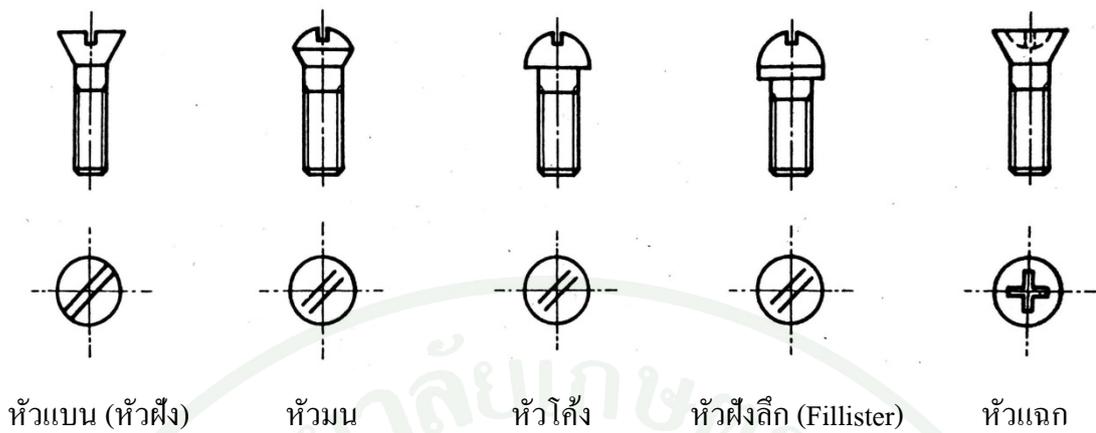
1.2.4 หมุดเกลียวจักรกล (Machine Screw)

1.2.5 หมุดเกลียวปรับ (Set Screw)



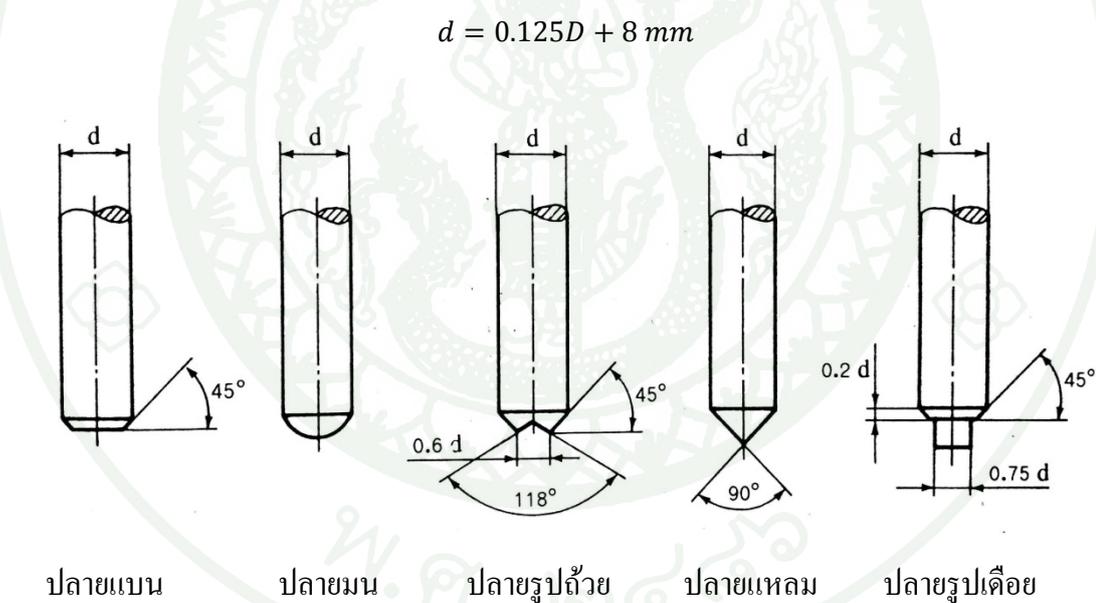
ภาพที่ 5 ชนิดของอุปกรณ์ยึดด้วยเกลียว

ที่มา: วรวิทย์ และ ชาญ (2545)



ภาพที่ 6 หมุดเกลียวจักรกลลักษณะต่าง ๆ

ที่มา: วรวิทย์ และ ชาญ (2545)



ภาพที่ 7 หมุดเกลียวปรับลักษณะต่าง ๆ

ที่มา: วรวิทย์ และ ชาญ (2545)

ส่วนใหญ่แล้วในงานวิจัยนี้จะใช้เกลียวยึดประเภท สลักเกลียวและแป้นเกลียว (Bolt and Nut) เป็นส่วนใหญ่ เพราะเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง และเหมาะสมต่อลักษณะการใช้งาน ส่วน

เกลียวยึดประเภทอื่นจะมีใช้อยู่บ้าง ตามลักษณะงานที่มีข้อจำกัด และเพื่อยึดชิ้นส่วนประกอบบางชิ้นที่ไม่ได้รองรับแรงกระทำมากจนเกินไป

2. การออกแบบลิ่ม

ลิ่ม คืออุปกรณ์ที่ใช้ประกอบระหว่างเพลลาหมุนและคูล้อให้หมุนไปพร้อมๆกัน ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการหมุนสัมพัทธ์ระหว่างเพลลาหมุนและชิ้นงาน ลิ่มนิยมใช้กันมากเพื่อการส่งถ่ายภาระแรงบิดจากเพลลาหมุนไปยังคูล้อของชิ้นงาน ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ลิ่มสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือ ลิ่มสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ง่าย ลิ่มจะทำมาจากวัสดุเหล็กกล้า AISI 1020 การออกแบบลิ่มต้องเลือกขนาดของลิ่มให้สอดคล้องกับการใช้งาน ยังต้องเลือกขนาดลิ่มตามมาตรฐาน ดูได้จากตารางขนาดของลิ่มที่ใช้กับเพลลาขนาดต่าง ๆ ตารางผนวกที่ ก1

ในกรณีของการออกแบบลิ่มนั้น ควรให้ลิ่มเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับเพลลา แล้วนำค่าคุณสมบัติของเหล็กกล้านั้นมาใช้หาค่าตามสมการดังนี้

$$\sigma_{cd} = \frac{\sigma_y}{N} \quad (2)$$

σ_{cd} คือ ความเค้นออกแบบ

N คือ ค่าความปลอดภัย

และ

$$\tau_d = 0.6\sigma_{cd} \quad (3)$$

τ_d คือ ความเค้นเฉือนออกแบบ

จากนั้นต้องทราบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา เพื่อไปเทียบกับตารางผนวกที่ ก1 ว่าควรให้ลิ่มมีลักษณะเป็นอย่างไร ขนาดเท่าไร และขนาดแรงบิดที่เพลลาได้รับนั้นมีค่าเท่าไร แล้วนำมาใช้หาความยาวของลิ่มในสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = \frac{2T}{bld} \quad (4)$$

- T คือ แรงบิดที่เพลลาได้รับ
 b คือ ความกว้างของลิ้ม
 l คือ ความยาวของลิ้ม
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเพลลา

และสมการ

$$\sigma_c = \frac{4T}{hld} \quad (5)$$

- h คือ ความหนาของลิ้ม

เมื่อหาความยาวของลิ้มจากสมการสมการที่ 4 และ 5 แล้ว นำมาเปรียบเทียบกับค่าความยาวอันไหนยาวกว่ากัน แล้วนำค่าความยาวนั้นมาใช้เป็นค่าความยาวลิ้ม

3. การเลือกใช้ตลับลูกปืน

การเลือกขนาดของตลับลูกปืนโดยการใช้อนุกรมอายุการใช้งาน วิธีการคำนวณอายุการใช้งานที่ง่ายที่สุดคือ การใช้สมการสำหรับอายุการใช้งานประเมินของมาตรฐาน ISO

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (6)$$

- L_{10} คือ อายุการใช้งานประเมิน เป็นจำนวนล้านรอบ
 C คือ แรงพลวัตประเมิน (N)
 P คือ แรงพลวัตของตลับลูกปืน (equivalent dynamic bearing load) (N)
 p คือ เลขยกกำลังของสมการอายุการใช้งาน
 = 3 สำหรับตลับลูกปืนเม็ดกลม
 = 3.333 สำหรับตลับลูกปืนเม็ดยาว (roller bearing)

แรงพลวัตสมมูล (equivalent dynamic bearing load) หมายถึง แรงที่มีขนาดและทิศทางคงที่ ซึ่งกระทำต่อตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมี (radial bearing) หรือสมมาตรกับแกนกลางของตลับลูกปืน

กันรุน แล้วจะทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนนั้นมีค่าเท่ากับแรงที่กระทำต่อตลับลูกปืนจริง ๆ ซึ่งจะมีทั้งแรงในแนวรัศมีและในแนวแกนพร้อมกันก็ได้

ตลับลูกปืนรับแรงในแนวรัศมีมักจะถูกกระทำด้วยแรงทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนพร้อมกัน ถ้าผลรวมของแรงมีค่าคงที่ทั้งขนาดและทิศทางแล้วแรงสมมูลจะคำนวณได้จากสมการ

$$P = XF_r + YF_a \quad (7)$$

| | |
|-------|---|
| P | คือ แรงสมมูลที่กระทำต่อตลับลูกปืน (นิวตัน) |
| F_r | คือ แรงกระทำในแนวรัศมี (นิวตัน) |
| F_a | คือ แรงกระทำในแนวแกนหรือแรงรุน (นิวตัน) |
| X | คือ ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี หาค่าได้จากตารางผนวกที่ ก3 |
| Y | คือ ตัวประกอบแรงรุน หาค่าได้จากตารางผนวกที่ ก3 |

การเลือกใช้งานขนาดของตลับลูกปืนควรที่จะใช้ค่าแรงสถิติประเมิน C_0 แทนที่จะใช้อายุการใช้งานของตลับลูกปืน ถ้าการใช้งานของตลับลูกปืนเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งต่อไปนี้

- ตลับลูกปืนอยู่นิ่งและรับแรงที่กระทำอย่างต่อเนื่องหรือกระทำเป็นระยะๆ
- ตลับลูกปืนเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอย่างช้า ๆ หรือมีการเคลื่อนเขียงแนวได้ในขณะรับแรง
- ตลับลูกปืนหมุนด้วยความเร็วรอบช้ามากในขณะรับแรง และต้องการให้มีอายุใช้งานสั้น ๆ เท่านั้น (ในกรณีเช่นนี้สมการอายุใช้งานสำหรับแรงสมมูลที่ต้องการ P จะให้ค่าแรงพลวัตประเมิน C ต่ำมาก จนกระทั่งตลับลูกปืนที่เลือกโดยใช้พื้นที่ฐานนี้จะถูกใช้งานเกินภาระที่ควรจะเป็น)
- ตลับลูกปืนหมุนรับแรงปกติและยังจะต้องรับแรงกระแทกที่มีขนาดสูงมาก ซึ่งจะกระทำเพียงระยะสั้น ๆ ต่อหนึ่งรอบการหมุน

เมื่อทำการคำนวณหาขนาดของตลับลูกปืนโดยใช้ความสามารถในการรับแรงสถิติ เราจะได้ค่าความปลอดภัย s_0 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงสถิติประเมิน C_0 และแรงสถิติสมมูล P_0 ที่กระทำต่อตลับลูกปืนแรงสถิติสมมูล หมายถึงแรง (ในแนวรัศมีสำหรับตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมี

หรือแรงรูนสำหรับตลับลูกปืนกันรูน) ซึ่งเมื่อนำมากระทำต่อตลับลูกปืนนั้นแล้ว จะทำให้เกิดการยุบตัวถาวรบนตลับลูกปืนเช่นเดียวกันกับแรงที่กระทำจริง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad (8)$$

P_0 คือ แรงสถิติสมมูล (N)

F_r คือ แรงในแนวรัศมีจริง (N)

F_a คือ แรงรูนจริง (N)

X_0 คือ ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี

Y_0 คือ ตัวประกอบแรงรูน

แรงสถิติประเมนที่จำเป็นส่งสำหรับการเลือกใช้ตลับลูกปืนหาได้จาก

$$C_0 = s_0 P_0 \quad (9)$$

C_0 คือ แรงสถิติประเมน (N)

P_0 คือ แรงสถิติสมมูล (N)

s_0 คือ ค่าความปลอดภัยสำหรับแรงสถิติ แสดงในตารางผนวกที่ ก4

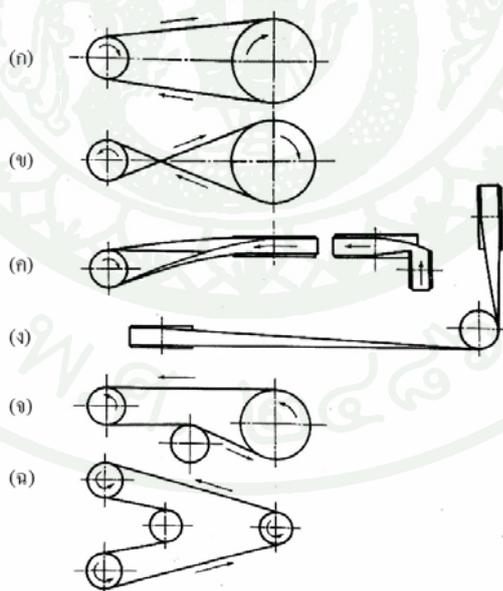
4. สายพาน

การส่งกำลังด้วยสายพานเป็นการส่งกำลังแบบอ่อนตัวได้ (Flexible) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียหลายประการเมื่อเปรียบเทียบการส่งกำลังโดยใช้เฟือง ข้อดีก็คือ มีราคาที่ถูกและใช้ง่าย รับแรงกระตุกและการสั่นสะเทือนได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียงดัง เหมาะสำหรับการส่งกำลังระหว่างเพลาที่อยู่ห่างกันมาก ๆ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ เป็นต้น แต่ก็มีข้อเสียคือ อัตราทดไม่แน่นอน เนื่องจากเกิดการสลลิป (Slip) และการครีฟ (Creep) ของสายพาน และต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างเพลาหรือปรับแรงตึงในสายพานระหว่างใช้งาน ในงานที่ต้องการอัตราทดรอบสูง ๆ จะใช้งานได้ไม่ดีเท่าที่ควร

สายพานแบ่งออกเป็นชนิดตามลักษณะหน้าตัดของสายพานคือ สายพานแบน (Flat Belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, สายพานลิ้ม (V-Belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู, สายกลม

(Ropes) มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม และ ไทม์มิงเบลท์ (Timing Belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่จะทำเป็นร่องคล้ายฟันเพื่อตลอดความยาวของสายพาน

เนื่องจากคุณสมบัติในการอ่อนตัวของสายพาน จึงอาจจัดลักษณะการขับของสายพานได้ต่าง ๆ กัน ลักษณะทั่วไปที่นิยมใช้ในการขับด้วยสายพานสามารถดูได้จากภาพที่ 8 เมื่อต้องการขับเพลลาที่อยู่ขนานกัน และต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนในทิศทางเดียวกัน จะใช้การขับแบบโอเพ่นไดรฟ์ (open drive) แต่ถ้าต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนสวนทางกันก็ทำได้โดยใช้วิธีครอสไดรฟ์ (crossed drive) และเพื่อไม่ให้สายพานสึกหรือจากการถูกันควรให้จุดศูนย์กลางของล้อสายพานอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่า 20 เท่าของความกว้างของสายพาน ส่วนการขับแบบควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (quarter turn drive) จะใช้เมื่อเพลลาทั้งสองตั้งฉากกัน และเพื่อป้องกันไม่ให้สายพานหลุดออกจากล้อสายพานในขณะที่ใช้งาน ต้องใช้ล้อสายพานที่มีขนาดกว้างเพียงพอ ส่วนการขับแบบมิลล์ไดรฟ์จะใช้เมื่อไม่สามารถใช้ขับในลักษณะ โอเพ่นไดรฟ์ได้ เพราะส่วนโค้งสัมผัสบนล้อสายพานมีค่าน้อยเกินไป และเมื่อไม่อาจทำให้สายพานตึงด้วยวิธีอื่น ก็อาจทำได้โดยใช้ล้อช่วย (idler) เป็นการช่วยให้สายพานสัมผัสกับล้อมากขึ้นซึ่งเพิ่มการส่งกำลังได้ด้วย ส่วนการขับแบบบริเวสไดรฟ์ ใช้เมื่อต้องการส่งกำลังไปยังเพลลาหลาย ๆ อันพร้อมกัน



ภาพที่ 8 ลักษณะการขับด้วยสายพาน (ก) โอเพ่นไดรฟ์ (ข) ครอสไดรฟ์ (ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (ง) มิลล์ไดรฟ์ (จ) แสดงการขับโดยใช้ล้อช่วย (ฉ) บริเวสไดรฟ์

ที่มา: วรวิทย์ และ ชาญ (2545)

5. การออกแบบโซ่

การส่งถ่ายกำลังด้วยโซ่มีลักษณะคล้ายกับการขับเคลื่อนด้วยสายพาน โซ่จะคล้องอยู่กับล้อ โซ่และเฟืองโซ่ (Sprocket) ซึ่งติดอยู่บนเพลาลูกเบี้ยวและเพลาดำตาม อัตราทดของการขับเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟืองโซ่ทั้งสอง และการขับเคลื่อนด้วยโซ่จะไม่มีอาการลื่น (slip) เกิดขึ้นระหว่างโซ่กับเฟือง

5.1 แรงในแนวเส้นสัมผัส

ในการส่งกำลัง ถ้าโซ่รับแรงสม่ำเสมอและเฟืองโซ่หมุนด้วยความเร็วคงที่ โซ่จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ v และมีแรงในแนวเส้นสัมผัส F_t ซึ่งจะหาค่าได้จากกำลังที่ส่ง W_p หรือแรงบิดที่ต้องการส่ง T

ความเร็วของโซ่หาได้จาก

$$v = pzn \quad (10)$$

ดังนั้นแรงในแนวเส้นสัมผัส

$$F_t = \frac{W_p}{v} \quad (11)$$

หรือ

$$F_t = \frac{2\pi nT}{v} = \frac{2\pi nT}{pzn} = \frac{2\pi T}{pz} = \frac{2T}{d} \quad (12)$$

F_t คือ แรงในแนวเส้นสัมผัส (N)

W_p คือ กำลังงาน

T คือ แรงบิด

v คือ ความเร็วรอบของเฟืองโซ่

z คือ จำนวนฟันของเฟืองโซ่

n คือ ความเร็วรอบของเฟืองโซ่

5.2 การคำนวณหาขนาดของโซ่

- หาจำนวนฟันของพีเนียน (คือจำนวนฟันบนเฟืองโซ่เล็ก)
- ตัวประกอบใช้งาน N_s สำหรับโซ่เพื่อใช้ประกอบในการเลือกขนาดโซ่แสดงในตารางผนวกที่ ก7

- กำหนดหาอัตราทดที่ต้องการได้จาก

$$m_\omega = \frac{n_1}{n} \quad (13)$$

n_1 คือ ความเร็วรอบของเพลารอบต่ำ

n_2 คือ ความเร็วรอบของเพลารอบสูง

- กำหนดหาจำนวนฟันบนเฟืองโซ่ใหญ่โดยคูณจำนวนฟันบนพีเนียนด้วยอัตราทด
- กำหนดหาค่าลึงที่ใช้เลือกโซ่ได้การคูณค่าลึงที่ต้องการส่งด้วยตัวประกอบการใช้งาน

$$P = W_p \times N_s \quad (14)$$

P คือ ค่าลึงที่ใช้ในการเลือกโซ่

- เลือกขนาดของโซ่ที่ต้องการใช้งาน
- กำหนดหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่และความยาวโซ่

เมื่อทราบระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่โดยประมาณแล้วหาจำนวนข้อโซ่ได้จาก

$$x = \frac{2C}{P} + \frac{Z+z}{2} + \left(\frac{Z-z}{2\pi}\right)^2 \frac{p}{C} \quad (15)$$

x คือ จำนวนข้อโซ่หรือจำนวนพิตช์ของโซ่

C คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองโซ่

p คือ ระยะพิตช์ของโซ่

z คือ จำนวนฟันบนพีเนียน

Z คือ จำนวนฟันบนเฟืองโซ่

หลังจากทราบจำนวนข้อโง่ที่แน่นอนแล้วจึงคำนวณหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลาง
เฟืองโง่ที่แท้จริงได้จากสมการ

$$C = \frac{p}{4} \left(x - \frac{z+z}{2} + \sqrt{\left(\left\{ x - \frac{z+z}{2} \right\}^2 - 2 \left\{ \frac{z-z}{\pi} \right\}^2 \right)} \right) \quad (16)$$

6. การออกแบบเพลลา

วิธีการคำนวณหาขนาดของเพลลาต่างกำลังซึ่งกำหนดเป็นโค้ด (code) ของสมาคมวิศวกร
เครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) เป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน วิธีการดังกล่าวนี้ใช้
ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลลาซึ่ง
เป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตย์ (static design method) แต่เพลลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่
เป็นวัฏจักร ทั้งนี้เพราะเพลลาหมุนอยู่ตลอดเวลา นอกจากนั้นแรงที่กระทำยังอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่
ตลอดเวลาได้ ดังนั้นเพลลาจึงเกิดความเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่สำหรับวิธีการ
คำนวณของ ASME ใช้วิธีการแบบสถิติศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบความล้า (fatigue factor)
มาเกี่ยวข้องด้วย

ในกรณีของเพลลาต้นจะได้สมการสำหรับหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (d) ดังนี้

$$d^3 = \frac{16}{\pi\tau(1-K^4)} [(C_t T)^2 + (C_m M)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

C_m คือ ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการตัด

C_t คือ ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

τ คือ ความเค้นเฉือน ($N \cdot m^{-2}$)

T คือ แรงบิด ($N \cdot m$)

M คือ โมเมนต์ตัด ($N \cdot m$)

ค่าตัวประกอบความล้าสามารถเลือกใช้ตามลักษณะของแรงที่กระทำ ซึ่งดูได้จากตาราง
ผนวกที่ 9

ถ้ากำหนดวัสดุของเพลลาที่บอกถึงหมายเลขของโลหะ หรือส่วนผสมของโลหะให้ใช้ค่า
ความเค้นเฉือนใช้งานจาก

$$\tau_d = 0.3\sigma_y \quad \text{หรือ} \quad \tau_d = 0.18\sigma_u \quad (18)$$

- τ_d คือ ค่าความเค้นเฉือนออกแบบ (นิวตันต่อตารางเมตร)
 σ_y คือ ค่าความต้านทานแรงดึงคราก (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
 σ_u คือ ค่าความต้านทานแรงดึงอัลติเมต (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

โดยเลือกใช้ค่าน้อยมาใช้ในการคำนวณ และถ้าเพลามีร่องลึ้มให้ลดค่าความเค้นเฉือนใช้งานโดยใช้เพียง 75% ของค่าที่นำมาใช้ดังกล่าว

7. ค่าความปลอดภัยในการออกแบบ (Safety Factor, N)

ค่าความปลอดภัยที่แนะนำสำหรับผู้ที่มีความชำนาญในการออกแบบแสดงดังตารางที่ 1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความปลอดภัยที่แนะนำ

| ชนิดของแรง | เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว | | เหล็กหล่อและโลหะเปราะ |
|---|--------------------------|-------|-----------------------|
| | N_y | N_u | N_u |
| 1. แรงอยู่นิ่ง | 1.5-2 | 3-4 | 5-6 |
| 2. แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือแรงกระแทกเล็กน้อย | 3 | 6 | 7-8 |
| 3. แรงซ้ำสองทิศทางหรือแรงกระแทกเล็กน้อย | 4 | 8 | 10-12 |
| 4. แรงกระแทกอย่างหนัก | 5-7 | 10-15 | 15-20 |

ที่มา: วริทธิ์ และ ชาญ (2541)

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัย หมายถึง ตัวเลขที่นำไปหารค่าดึงความต้านแรงดึง, σ_u หรือ ความต้านแรงดึงคราก, σ_y ของวัสดุ เพื่อให้ได้ความเค้นใช้งานที่ใช้ในการออกแบบ, σ_d

$$N_y = \frac{\text{Yield Stress}}{\text{Allowable Stress}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_d} \quad (19)$$

$$N_u = \frac{\text{Ultimate Stress}}{\text{Allowable Stress}} = \frac{\sigma_u}{\sigma_d} \quad (20)$$

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ความสำคัญและประโยชน์ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

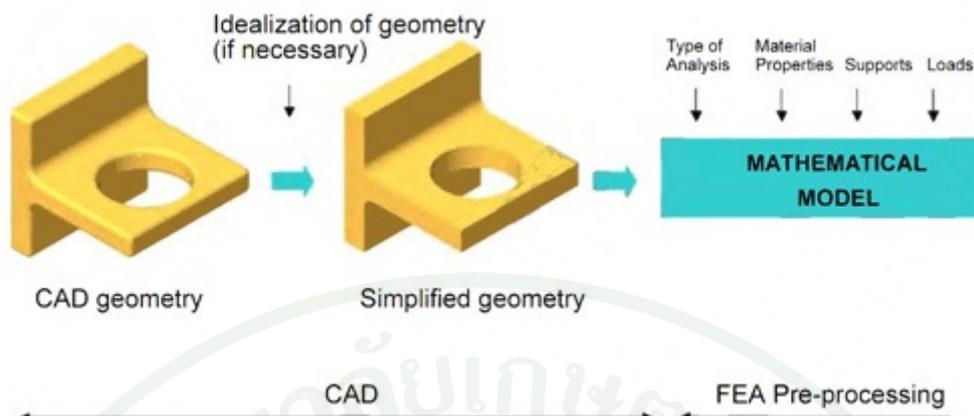
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีบทบาทเป็นอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ในขณะที่ช่วยลดปริมาณการใช้เนื้อวัสดุลง หลีกเลี่ยงการทดลองถูกที่เคยใช้กันในอดีต ช่วยลดค่าใช้จ่ายทั้งค่าแรงและค่าวัสดุ รวมทั้งเวลาที่ใช้ไป และสำคัญที่สุด ทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถออกแบบปรับปรุงผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ให้ดียิ่งขึ้นไปได้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ด้วยการวิเคราะห์ปัญหาอันประกอบด้วย

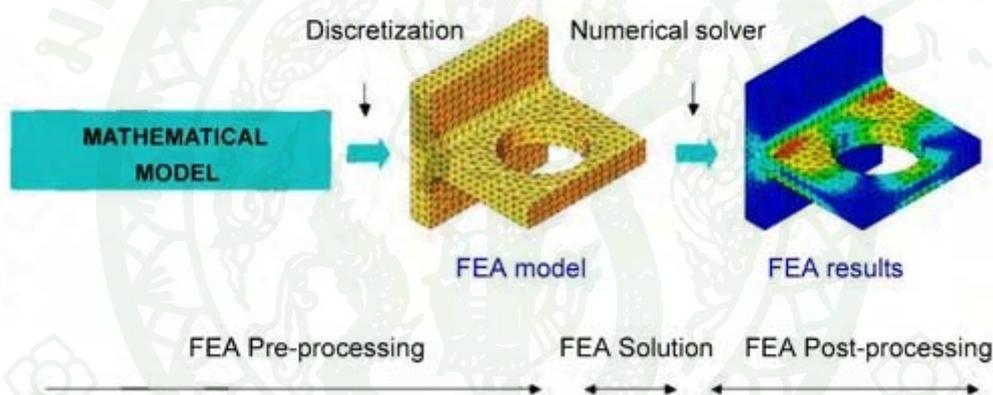
- สมการเชิงอนุพันธ์
- เงื่อนไขขอบเขต
- รูปร่างของปัญหา

2. ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานด้วยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบหรือ Computer Aided Design (CAD) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้น การใช้งานจึงทำได้สะดวก รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก โดยการออกแบบชิ้นงานด้วยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยขั้นตอนการจัดเตรียมแบบจำลองและการวิเคราะห์ชิ้นงานสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



ภาพที่ 9 กระบวนการจัดเตรียมแบบจำลอง



ภาพที่ 10 กระบวนการวิเคราะห์

ที่มา: ศุภชัย และ สถาพร (2549)

2.1 การสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์

ศุภชัย และ สถาพร (2549) ในการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถเชื่อมโยงชิ้นส่วนจากโปรแกรมออกแบบชิ้นงานสามมิติได้ ชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น เอลิเมนต์ย่อยเล็ก ๆ ที่มีจำนวนจำกัดสามารถนับได้ (Finite element mesh) ขนาดของเอลิเมนต์จะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติหรือกำหนดโดยผู้ออกแบบเองก็ได้ สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบที่จะมีผลกับการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยนั้นมีด้วยกัน 3 ลำดับดังนี้

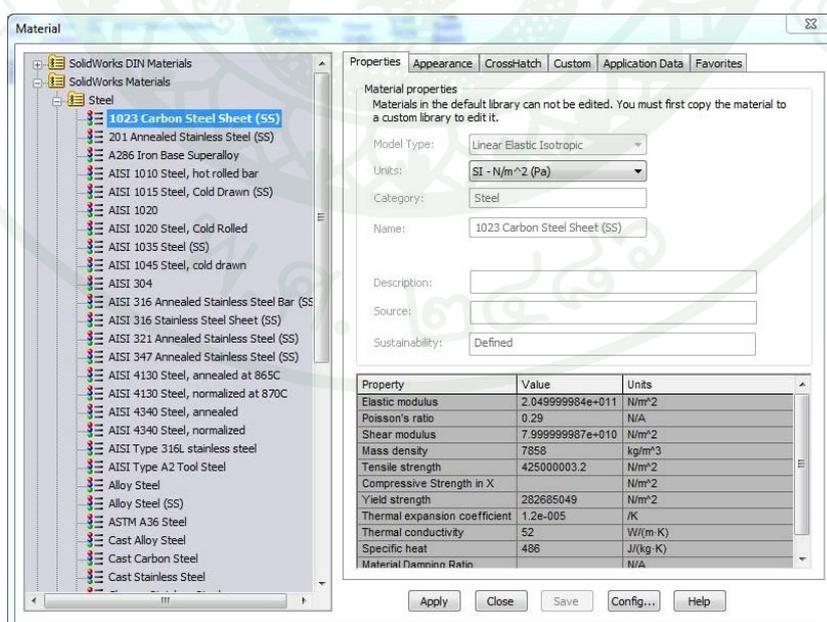
Defeaturing เป็นการพิจารณาขั้นตอนในการสร้างชิ้นงาน โดยอาจต้องปรับปรุงรูปทรงของชิ้นส่วนเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ เช่น การแก้ไขลบมุมของชิ้นงาน การแก้ไขขนาดของรูปทรง

Idealization เป็นการพิจารณารูปทรงของชิ้นงาน โดยลดความยุ่งยากในการคำนวณที่จะเกิดขึ้น เช่น การเปลี่ยนรูปแบบในการออกแบบชิ้นงานให้ง่ายขึ้น ไม่ซับซ้อน การปรับแต่งผิวชิ้นงาน

Clean-up เป็นการกำหนดบริเวณในการสร้างเอลิเมนต์ โดยบริเวณที่ไม่มีผลกระทบจากการกระทำของแรงเอลิเมนต์สามารถมีขนาดใหญ่ไม่หนาแน่น แต่บริเวณที่มีผลกระทบจะสร้างให้มีความหนาแน่นของเอลิเมนต์มากขึ้นได้

2.2 การกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของชิ้นงาน

ผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของชิ้นงานที่ทำการออกแบบได้หลายอย่างกว้าง ๆ สองวิธีคือการกำหนดด้วยค่าที่กำหนดเอง หรือการกำหนดค่าด้วยข้อมูลที่มีอยู่แล้วในโปรแกรมวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

2.3 การกำหนดการจับยึดชิ้นงาน

ขั้นตอนที่สำคัญส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ คือการกำหนดการจับยึดชิ้นงาน เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีผลกับการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ผู้ออกแบบนั้นสามารถเลือกชนิดของการจับยึดจากโปรแกรมวิเคราะห์ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก10

2.4 การกำหนดแรงกระทำ

ผู้ออกแบบสามารถกำหนดลักษณะและทิศทางของแรงกระทำได้โดยพิจารณาให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากที่สุด ในโปรแกรมวิเคราะห์นั้นสามารถเลือกแรงกระทำต่าง ๆ ได้ เช่น การรับแรงกระทำแบบกระจาย การรับแรงกระทำแบบเป็นจุด โดยได้แสดงลักษณะของการกำหนดแรงกระทำไว้ในตารางผนวกที่ ก11

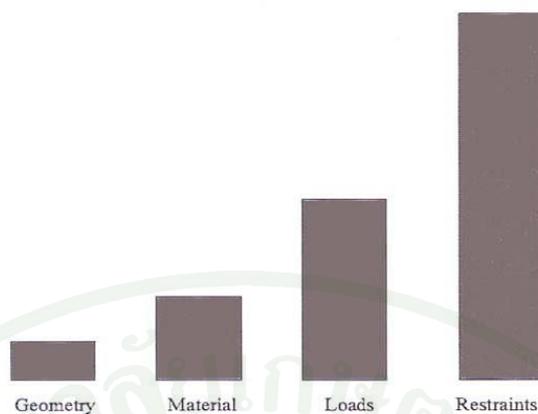
2.5 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลลัพธ์ที่แสดงบนชิ้นงานจะมีการแสดงออกมาในรูปแบบของการรายงานในรูปแบบไฟล์ตามที่ผู้ออกแบบต้องการพิจารณา ยกตัวอย่างเช่น ผลของค่าความเค้น ผลของค่าความเครียด ผลของค่าการเคลื่อนที่ ผลของค่าความปลอดภัยในการออกแบบ

ค่าความผิดพลาดจากการคำนวณ สามารถแบ่งชนิดของข้อผิดพลาดออกได้ 3 ชนิดคือ

- ผิดพลาดจากการใช้งานหรือเลือกวิธีการที่ผิด
- ผิดพลาดจากการป้อนค่าไม่ถูกต้องในช่วงการทำโมเดลคณิตศาสตร์
- ผิดพลาดจากการหาค่าผลเฉลย

โดยจากการสำรวจผู้ใช้งานพบว่าปริมาณความเสี่ยงต่อความผิดพลาดมักจะมีเกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กระบวนการและความผิดพลาด

ที่มา: ศุภชัย และ สถาพร (2549)

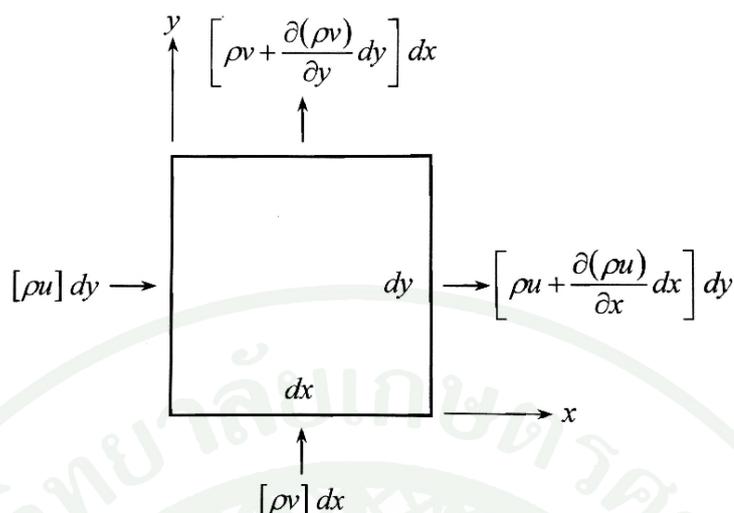
พลศาสตร์ของไหล

1. สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล

การวิเคราะห์ปัญหาใด ๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์หรือวิทยาศาสตร์ ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยปกติจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาและลักษณะรูปร่างของปัญหา

1.1 สมการอนุพันธ์มวล

สมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลนี้เป็นสมการอนุพันธ์มวล เมื่อพิจารณาของไหลที่เดินทางผ่านกรอบเล็ก ๆ ที่มีขนาด dx และ dy ซึ่งมีความลึกหนึ่งหน่วยดังภาพที่ 13 จากหลักความเป็นจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นปริมาณมวลที่เพิ่มขึ้นในการไหลผ่านกรอบเล็ก ๆ นี้คือ



ภาพที่ 13 รูปแบบของมวลที่เดินทางผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล

ที่มา: ปราโมทย์ (2553)

ในทิศแกน x

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy - [\rho u] dy = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy \quad (21)$$

ในทิศแกน y

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx - [\rho v] dx = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy \quad (22)$$

โดย u และ v เป็นความเร็วย่อยในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ซึ่งความเร็วย่อยนี้มีค่าขึ้นอยู่กับพิกัด x, y นั่นคือ $u = u(x, y, t)$ และ $v = v(x, y, t)$ และเนื่องจากปริมาณมวลในกรอบเล็ก ๆ เป็น $\rho dx dy$ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ลดลงไปคือ $-(\partial\rho/\partial t) dx dy$ หมายความว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลจะเท่ากับปริมาณที่ลดลง ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์มวลคือ

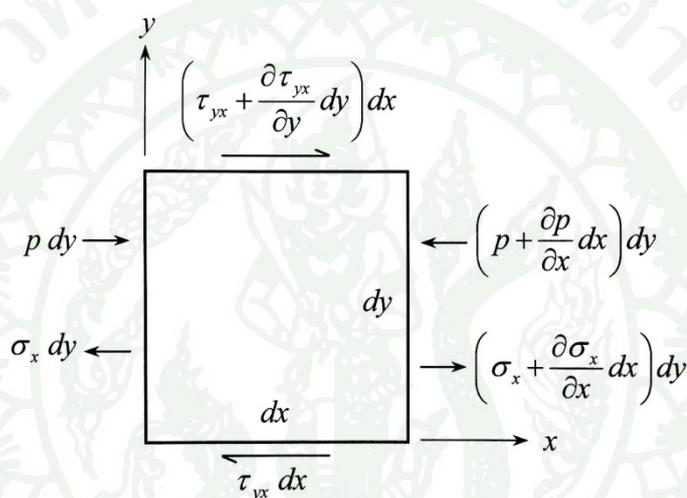
$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (23)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (24)$$

1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ เมื่อพิจารณามวลของไหลซึ่งมีขนาดขนาด dx และ dy โดยมีความลึกหนึ่งหน่วยดังภาพที่ 14 ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล



ภาพที่ 14 รูปแบบของแรงต่าง ๆ ในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

ที่มา: ปราโมทย์ (2553)

ดังนั้นเมื่อรวมแรงทั้งหมดในในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dx dy + \rho f_x dx dy \quad (25)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ $m = \rho (dx \, dy)$ และความเร่งตามแนวแกน x คือ $a_x = Du/Dt$ เมื่อแทนค่า m และ a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (26)$$

ทำนองเดียวกันกับแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \rho f_y \quad (27)$$

สมการทั้งสองนี้เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์นี้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ธรรมดาได้ดังนี้

ในทิศแกน x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \vec{\nabla}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} \left[u \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \quad (28)$$

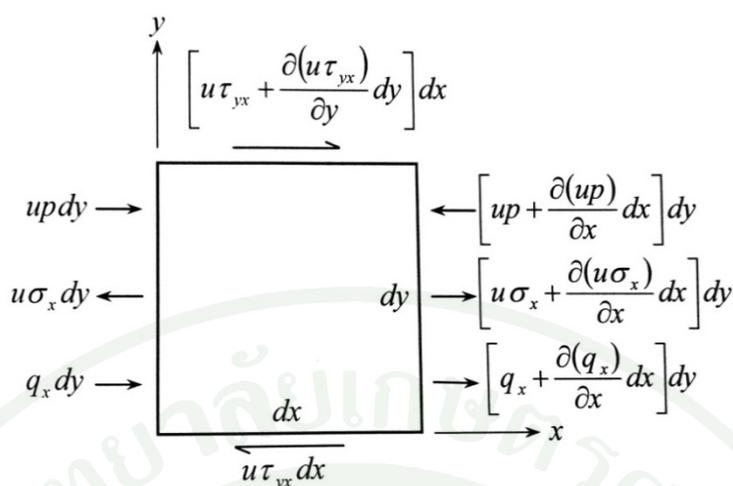
ในทิศแกน y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \vec{\nabla}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[v \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \quad (29)$$

1.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

เมื่อพิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 15 จากหลักการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎของเทอร์โมไดนามิกว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” จะสามารถสร้างสมการเชิงอนุรักษ์พลังงานได้เป็น

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (30)$$



ภาพที่ 15 รูปแบบงานและพลังงานที่เกิดขึ้นในทิศแกน x ผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

ที่มา: ปราโมทย์ (2553)

สมการด้านบนอยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาเพื่อที่จะสามารถใช้ร่วมกับสมการเชิงอนุพันธ์มวลและโมเมนตัมได้ เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{V} \right] + \text{div} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \bar{f} \cdot \vec{V} \quad (31)$$

2. สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน

สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นประกอบไปด้วย สมการกฎทรงมวลและสมการโมเมนตัม ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในการไหลนี้เป็นการเกิดขึ้นอย่างไม่มีระเบียบและไม่สามารถคาดเดาได้ว่าจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด แม้แต่ในขณะนี้สาเหตุของการเกิดความปั่นป่วนในการไหล และพฤติกรรมการปั่นป่วนของการไหลก็ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ในทางวิศวกรรมวิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์์ถูกนำมาใช้กับสมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วน โคนวิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์์มีหลักการดังนี้

1. แทนค่าตัวแปรใด ๆ ในสมการการเคลื่อนที่ด้วยค่าเฉลี่ยและค่าความผันของตัวแปร
2. ทำการเฉลี่ยสมการการเคลื่อนที่ข้างต้นด้วยเวลา

3. ทำการจัดรูปสมการโดยให้เงื่อนไข $\bar{u}'_i = 0$

สมการกฎทรงมวลที่ถูกเฉลี่ยด้วยวิธีเรย์โนลด์

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (32)$$

สมการโมเมนตัมที่ถูกเฉลี่ยด้วยวิธีเรย์โนลด์

$$\frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \right\} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} = 0 \quad (33)$$

จะเห็นได้ว่ามีพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้วิธีเฉลี่ยเรย์โนลด์คือ พจน์ Reynolds Stresses ($\overline{u'_i u'_j}$) ซึ่งพจน์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นพจน์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการปั่นป่วนของการไหล

3. แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล (Turbulence Models) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองพจน์ความปั่นป่วนของการไหล ซึ่งพจน์ที่เกิดขึ้นจากการเฉลี่ยนี้เรียกว่าพจน์ Reynolds Stresses ($\overline{u'_i u'_j}$) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหลนั้นมีหลายชนิด แต่ชนิดที่นิยมใช้ในซอฟต์แวร์ CFD สำเร็จรูปคือ แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-ε ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้ประกอบไปด้วยสมการ 2 สมการคือ สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน k และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ε โดยแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-ε เองนั้นก็ยังมีหลายแบบ ซึ่งแตกต่างกันที่ค่าคงที่และฟังก์ชันที่ใช้ในแบบจำลอง โดยแบบที่นิยมคือ แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-ε ของ Launder และ Sharma (1975)

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-ε เป็นแบบจำลองหนึ่งในหลายแบบที่ใช้แนวความคิดของความหนืดหมุนวน (Eddy Viscosity) ที่นำเสนอโดย Boussinesq (1877) กล่าวคือ พจน์ Reynolds Stresses ($\overline{u'_i u'_j}$) จะถูกจำลองผ่านพจน์ความหนืดหมุนวน (μ_t)

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (34)$$

โดยสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k - ε ความหนืดหมุนวน (μ_t) สามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (35)$$

แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k - ε มีสมการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ k และ ε (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \text{div}(pk\bar{U}) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad } k\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (36)$$

$$\frac{\partial(p\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(p\varepsilon\bar{U}) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \text{grad } \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (37)$$

โดย G_k คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย, G_b คือ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว(Buoyancy), Y_M คือ ค่าการกอดัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่, σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl number ของ k และ ε ตามลำดับ, C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น

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

4. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)

4.1 ความสำคัญและประโยชน์ของ CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ กระบวนการในการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ระบบสมการการเคลื่อนที่ของพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer) การถ่ายเทมวล(Mass Transfer)และอื่นๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Programming) ช่วยในการคำนวณ

ประโยชน์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีหลากหลายด้าน ในด้านวิศวกรรม มีการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ช่วยในการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

ใหม่เพราะสามารถแก้ไขปรับปรุงได้ในคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ช่วงแรกในการออกแบบ เช่น การออกแบบรูปร่างของรถยนต์ให้มีความลู่ลม (Aerodynamics) ที่สุดเพื่อลดแรงจุด (Drag Force) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านอากาศ ซึ่งการออกแบบโดยใช้การทดลองนั้น จะต้องมีการสร้างแบบจำลองรถยนต์ขึ้นมาจริงๆ ตามจำนวนแบบรถยนต์ที่ได้ทำการออกแบบไว้และนำไปทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel) เพื่อวัดแรงจุดที่กระทำกับตัวรถ ซึ่งหากมีการออกแบบไว้มาก ก็จะทำให้ต้องสร้างแบบจำลองรถยนต์มาก ส่งผลถึงการทดลองในอุโมงค์ลมก็มากขึ้นด้วย

การนำเอาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วย จะสามารถลดเวลาและการทดลองลงได้ เพราะสามารถที่จะทำการคำนวณค่าแรงจุดที่กระทำกับตัวรถในแบบต่างๆ ได้ในคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจึงเลือกแบบที่มีแรงจุดน้อยที่สุดประมาณ 3 แบบมาสร้างแบบจำลองและทำการทดลองในอุโมงค์ลมจึงช่วยลดขั้นตอนต่างๆ ลง เหตุผลที่ยังต้องมีการทดลองในอุโมงค์ลมอยู่ ก็เพราะว่าค่าที่ได้จากการคำนวณของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นค่าประมาณ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงเป็นกระบวนการที่ช่วยเสริมกระบวนการทดลอง ไม่สามารถแทนที่การทดลองทั้งหมดได้ ประโยชน์ของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนอกจากช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบแล้ว ยังช่วยลดความเสี่ยงและความเป็นไปไม่ได้บางประการของกระบวนการทดลอง

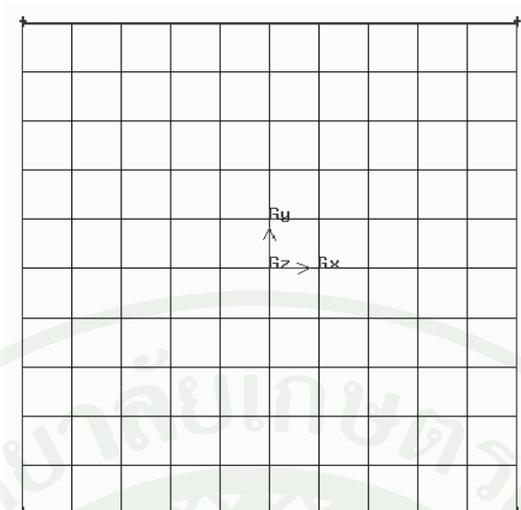
4.2 ขั้นตอนการทำ CFD

ขั้นตอนการทำ CFD นี้ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้

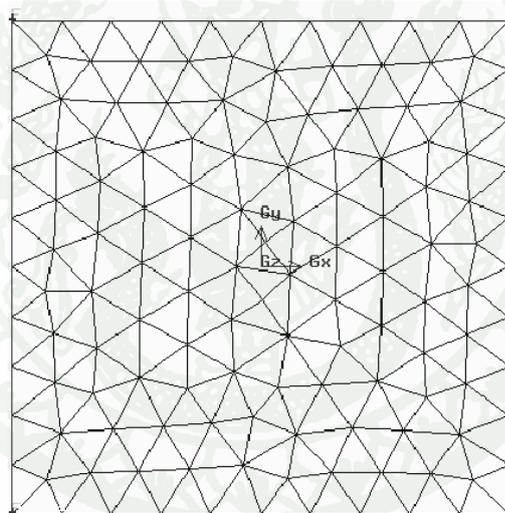
1. ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)

1.1 การสร้างขอบเขต (Domain) ส่วนใหญ่แล้วขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะทางด้าน CAD (Computer-Aided Design) เช่น AutoCAD, Pro Engineer, และ Solidwork เป็นต้น ช่วยในการสร้างขอบเขตของปัญหาที่ต้องการศึกษา

1.2 การสร้างกริด (Grid Generation) ในส่วนของขั้นตอนนี้จะทำการแบ่งชิ้นงานเป็นขอบเขตย่อยเล็ก มีรูปแบบหลายรูปแบบ เช่น สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม เป็นต้น การกระจายตัวของกริดนี้มีด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid) และกริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Grid) ดังภาพที่ 16 และ 17



ภาพที่ 16 กริดมีโครงสร้าง (Structure Grid)



ภาพที่ 17 กริดไม่มีโครงสร้าง (Unstructure Grid)

1.3 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น (Define Boundary Value and Initial Value) เงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้นนี้เป็นการกำหนดรูปแบบของปัญหาที่เรากำลังศึกษาอยู่ สิ่งที่ต้องระบุโดยทั่วไปในการสร้างขอบเขตมีดังนี้

- กำหนดความเร็ว (ที่ทางเข้าหรือที่ผนังเมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ)
- สร้างโครงสร้างความเร็ว (ที่ผนังเมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน)
- กำหนดพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน

- กำหนดความดัน (Pressure) ที่ทางออก
- ระบุค่าของขอบเขตที่เป็นวงกลม เมื่อตัวแปรการไหลเหมือนกันทุกจุดที่ตรงกันบนขอบเขตทั้งสอง

ถ้าต้องการแก้ปัญหาที่เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady state) ต้องระบุขอบเขตอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าต้องการแก้ปัญหาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady state) ต้องระบุเงื่อนไขเริ่มต้นด้วย มีค่าของตัวแปรการไหลที่จุดเริ่มต้นของการคำนวณ และตัวแปรเหล่านี้ต้องระบุที่ทุกจุดของอาณาเขตการไหล หลายครั้งที่มีบางค่าไม่ทราบค่าอย่างแน่นอน ดังนั้นต้องทำการสมมติขึ้นมา ถึงแม้ว่าปัญหาจะแก้ไขโดยวิธีที่เป็นการไหลแบบคงตัว บางครั้งก็ระบุเงื่อนไขเริ่มต้นด้วย โดยโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมจะสมมติค่าเริ่มต้นของตัวแปรการไหลให้

2. ขั้นตอนประมวลผล (Processing)

2.1 จัดรูปสมการให้เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณา ในขั้นนี้ คือ การจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลและความร้อนให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมกับปัญหาที่เราต้องการศึกษา

2.2 การทำให้สมการไม่ต่อเนื่อง (Discretisation) การทำให้สมการไม่ต่อเนื่องนี้ คือ การแปลงสมการที่มีรูปแบบต่อเนื่องที่อยู่ในรูปพีชคณิต (Algebraic Equation) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ วิธีที่นิยมใช้สำหรับการแก้ปัญหานี้ คือ วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) เนื่องจากวิธีนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับวิธีไฟไนต์วอลุ่มนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์ (Conservation Law) จึงทำให้เหมาะสมกับการแก้ปัญหาด้านความร้อนและของไหล

2.3 วิธีการหาผลเฉลย (Solution) ในส่วนนี้ระบบสมการที่ถูกจัดรูปโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่มนั้นจะถูกแก้ระบบสมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมในการแก้ระบบสมการพีชคณิตใน CFD คือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ (Iterative Method)

3. ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)

ขั้นตอนหลังการประมวลผลนี้ จะทำการนำข้อมูลดิบที่ได้จากการคำนวณ มาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ตามงานที่ต้องการนำไปใช้ ได้แก่ รูปกราฟ (Graph), แอปส์ (Contour) และเวกเตอร์ (Vector) เป็นต้น

5. การไหลแบบหลายเฟส

การไหลต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติหรือการไหลในอุปกรณ์ต่างๆ พบว่า บางส่วนเป็นการไหลแบบหลายเฟส (Multi-phase) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง (อนุภาค) เช่น การตกตะกอนของดิน โคลน การไหลของผงถ่านหินในท่อลำเลียง การกระจายตัวของอนุภาคในระบบลดความชื้นแบบ Fluidize bed การเดือดของน้ำและอื่นๆ (Versteeg and Malalasekera, 1995) การไหลแบบหลายเฟสสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงกลุ่มของการไหลแบบหลายเฟส

| รูปแบบการไหล | ตัวอย่าง |
|---------------------------------------|--|
| อากาศ-ของเหลว Gas-Liquid | - ฟองอากาศในน้ำ (Bubbly Flows) - การไหลแบบแยกชั้นในท่อ (Separated Flows) - การไหลของอากาศที่มีความชื้น (หยดน้ำ) (Gas-droplet Flows) |
| อากาศ-ของแข็ง Gas-Solid | - ระบบลำเลียงโดยใช้ลม (Gas-particle Flows) - อุปกรณ์ด้านฟลูอิดิไซด์เบด (Fluidized beds) |
| ของเหลว-ของแข็ง Liquid- Solid | - การไหลของซีเมนต์ (Slurry Flows) - ระบบลำเลียงโดยใช้น้ำ (Hydro transport) |
| การไหลแบบสามสถานะ Three Phase Flow | - ฟองอากาศในการไหลของซีเมนต์ (Bubbles in a slurry Flows) - การไหลที่เกิดหยดน้ำระบบลำเลียงโดยใช้ลม (Droplets/particles in gaseous Flows) |

เนื่องจากการศึกษาการไหลในอุปกรณ์เหล่านี้มีความยุ่งยากซับซ้อน การจำลองการไหลโดยใช้คอมพิวเตอร์จึงได้รับความสนใจมากขึ้น และความสามารถของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันก็มีความสามารถสูงขึ้นมา ทำให้การนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานสะดวกมากขึ้น มีการนำไปประยุกต์ใช้

กับงานด้านต่างๆ โดยในการจำลองการไหลนั้นจะใช้การคำนวณแบบ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) ในการคำนวณ ซึ่งการจำลองการไหลโดยใช้ CFD นั้นมีประโยชน์อย่างมาก จึงมีการประยุกต์ใช้กับการไหลแบบต่าง ๆ มากมาย

งานวิจัยทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยด้านการไหลแบบหลายเฟสพบว่ามีกรณีนำโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้เพิ่มมากขึ้น และสามารถทำนายปรากฏการณ์การไหลแบบหลายเฟสได้ถูกต้องแม่นยำเพิ่มมากขึ้นด้วย ตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมา เช่น

Mazur *et al.* (2004) ได้ศึกษาการสึกหรอในวาล์วบายพาสของกังหันไอน้ำที่เกิดจากอนุภาคของแข็งในการไหลของไอน้ำโดยใช้โปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อที่จะลดการสึกหรอในตัววาล์ว ในการศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นภายในวาล์วบายพาสซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Renormalization Group k- ϵ ในส่วนของการศึกษาการไหลของอนุภาคของแข็งจะพิจารณาด้วย Lagrange approach และใช้วิธีการของ Discrete Random Walk (DRW) ซึ่งจะรวมแบบจำลองการสึกกร่อนของ Finnie ที่ใช้กับวัสดุอ่อน (ductile material) จากการจำลองการไหลของอนุภาคในสามมิติและการสึกหรอของวาล์วพบว่าการสึกหรอของวาล์วโดยส่วนมากขึ้นอยู่กับทิศทางและมุมปะทะของอนุภาค จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงของวาล์วทำให้ช่วยลดการสึกกร่อนของบายพาสวาล์วได้ถึง 51% และยังมีอายุการบำรุงรักษาได้เป็น 100 %

Shan *et al.* (2006) ได้นำเสนอการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการพ่นสีขึ้นงานภายใต้สภาวะที่เป็นสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อที่จะศึกษาการไหลของอากาศและอนุภาคภายใต้สภาวะที่กำหนดและศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อทิศทางของอนุภาคและคุณภาพของการเคลือบผิว ในการศึกษาใช้แบบจำลองแบบสามมิติใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ k- ϵ และ Lagrangian approach สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนที่มีหลายเฟส โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการคำนวณสำหรับบริเวณใกล้ผนังแบบ Non-equilibrium wall function ในส่วนของ User define function จะทำการกำหนด Drag force, gravity force และ electrostatic field เพื่อใช้ในการคำนวณสัดส่วนโดยปริมาตรน้อยกว่า 0.1 % จากการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีการเคลื่อนที่ในแนวการไหลได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และยังใช้อัตราการไหลของของไหลต่ำ อนุภาคขนาดเล็กสามารถลอยอยู่ได้นาน ทำให้โอกาสที่จะ

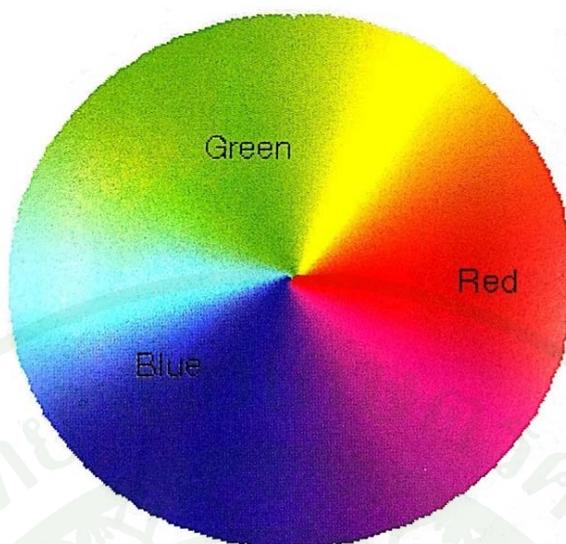
เคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวได้มาก ทำให้การเคลือบผิวชิ้นงานมีประสิทธิภาพดี อนุภาคขนาดใหญ่มีโมเมนตัมสูงทำให้การควบคุมแนวการเคลื่อนที่ยากและต้องใช้อัตราการไหลสูง นอกจากนี้การเหนียวนาของสนามไฟฟ้ายังมีผลต่อการเกาะตัวของสีด้วย โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและความต่างประจุสูงจะทำให้การเกาะตัวดีขึ้นด้วย

ในปี พ.ศ. 2552 ปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์ และชวลิต กิตติชัยการ ได้ศึกษาการพ่นเส้นใยฝ้ายเป็นกระบวนการสำคัญของอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง โดยใช้โปรแกรมคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง พิจารณาโดเมนของแบบจำลองสามมิติด้วยวิธีการ Eulerian-Lagrangian โดยแบ่งเป็นการจำลองการไหลของของไหลหลัก (อากาศ) ซึ่งใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ในขณะที่การจำลองการเคลื่อนที่ของเส้นใยฝ้ายจะใช้วิธีการพิจารณาแบบ Lagrange และ Stochastic tracking with Discrete Random Walk (DRW) จากการศึกษาพบว่าเมื่อกำหนดให้แผ่นปรับรูปแบบการไหล (Damper) ที่ติดตั้งตรงทางออกของช่องการไหลด้านข้างเอียงทำมุม 40 องศา กับแนวช่องเพื่อหลีกเลี่ยงผลของการไหลในช่องการไหลกลาง จะทำให้การเกาะตัวของเส้นใยฝ้ายมากขึ้น 15% และสามารถลดปริมาณเส้นใยที่เป็นของเสียลงได้ 29% ของกระบวนการเดิม

แบบจำลองสี HSI

แบบจำลองสี HSI (Hue-Saturation-Intensity) เป็นพิกัดการแสดงสีอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญมากในทางปฏิบัติ มีหลักการและคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากแบบจำลองสี RGB อย่างชัดเจน โดยทฤษฎีแล้วการพัฒนาแบบจำลองสี HSI มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ได้แบบจำลองสีที่เหมาะสมสอดคล้องกับธรรมชาติการมองเห็นของมนุษย์ ในขณะที่แบบจำลองสี RGB ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการแสดงผลบนจอภาพคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปเราพบว่า ตามธรรมชาติมนุษย์สามารถมองเห็นรับรู้และเข้าใจสีได้ง่ายโดยพิจารณาจากค่า hue (H), saturation (S) และ intensity (I) มากกว่าการบรรยายสีในรูปของปริมาณสัดส่วนของ red (R), green (G) และ blue (B)

ค่าโทนสี (hue) ในวงล้อสีแต่ละโทนสามารถแสดงได้ในรูปของมุม 0 ถึง 360 องศา ยกตัวอย่างเช่น สีแดงกำหนดให้มียค่าเท่ากับ 0 องศา สีเขียวมีค่าเท่ากับ 120 องศา และสีน้ำเงินมีค่าเท่ากับ 240 องศา คำว่าโทนสี (hue) มีความหมายที่แตกต่างจากคำว่าสี (color) เพราะสีหมายถึงถึงทั้งค่าความสว่าง (intensity) ค่าความอิ่มตัว (saturation) และค่าโทนสี (hue) ด้วย



ภาพที่ 18 ภาพวงล้อสี (color wheel)

ที่มา: วิทยากร และคณะ (2555)

ค่าความอิ่มตัวของสี (saturation) หมายถึงระดับความเข้มข้นของค่าโทนสีที่มีอยู่ในสี โดยให้พิจารณาไล่ลำดับจากสีที่มีองค์ประกอบโทนสีบริสุทธิ์ทั้งหมด ไปยังสีที่มีองค์ประกอบของสีเทาเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดกลายเป็นสีที่มีแต่องค์ประกอบของสีเทาทั้งหมด กำหนดให้ค่าความอิ่มตัวเป็น 0 ในกรณีที่เป็นสีเทาทั้งหมด (no saturation) และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 เมื่อเป็น โทนสีบริสุทธิ์ (high saturation) ฉะนั้น ค่าความอิ่มตัวของสีจึงบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของสี นั่นคือ ยิ่งค่าความอิ่มตัวมากก็หมายถึงมีความบริสุทธิ์มาก แต่ถ้ามีการปนกันของสีเทาในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ก็จะมีค่าความอิ่มตัวน้อยลงตามลำดับ

ค่าความสว่าง (intensity) หมายถึงปริมาณของความสว่างในสี นั่นคือ ถ้าสีที่พิจารณามีค่าความสว่างมากจะมองดูสว่าง ในทางกลับกันสีที่มีค่าความสว่างน้อยจะได้สีที่ดูมืด ค่าความสว่างไม่เหมือนกับค่าความอิ่มตัวของสีเพราะปริมาณเนื้อโทนสีที่มีอยู่ในสีไม่ได้ลดลงหรือเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เพียงแต่ความสว่างของสีเพิ่มขึ้นเท่านั้น เราสามารถเปรียบเทียบค่าความสว่างได้กับวงจรปรับความสว่างของหลอดไฟในบ้าน กล่าวคือ แสงไฟมีความสว่างมากขึ้นโดยที่โทนสีของหลอดไฟไม่ได้เปลี่ยนไปแต่อย่างใด หรือจะเทียบกับการปรับปุ่มความสว่างของจอมอนิเตอร์ก็ได้ โดยจะเห็นว่าโทนสีของจอภาพไม่เปลี่ยนแปลงแต่มีความสว่างมากขึ้น

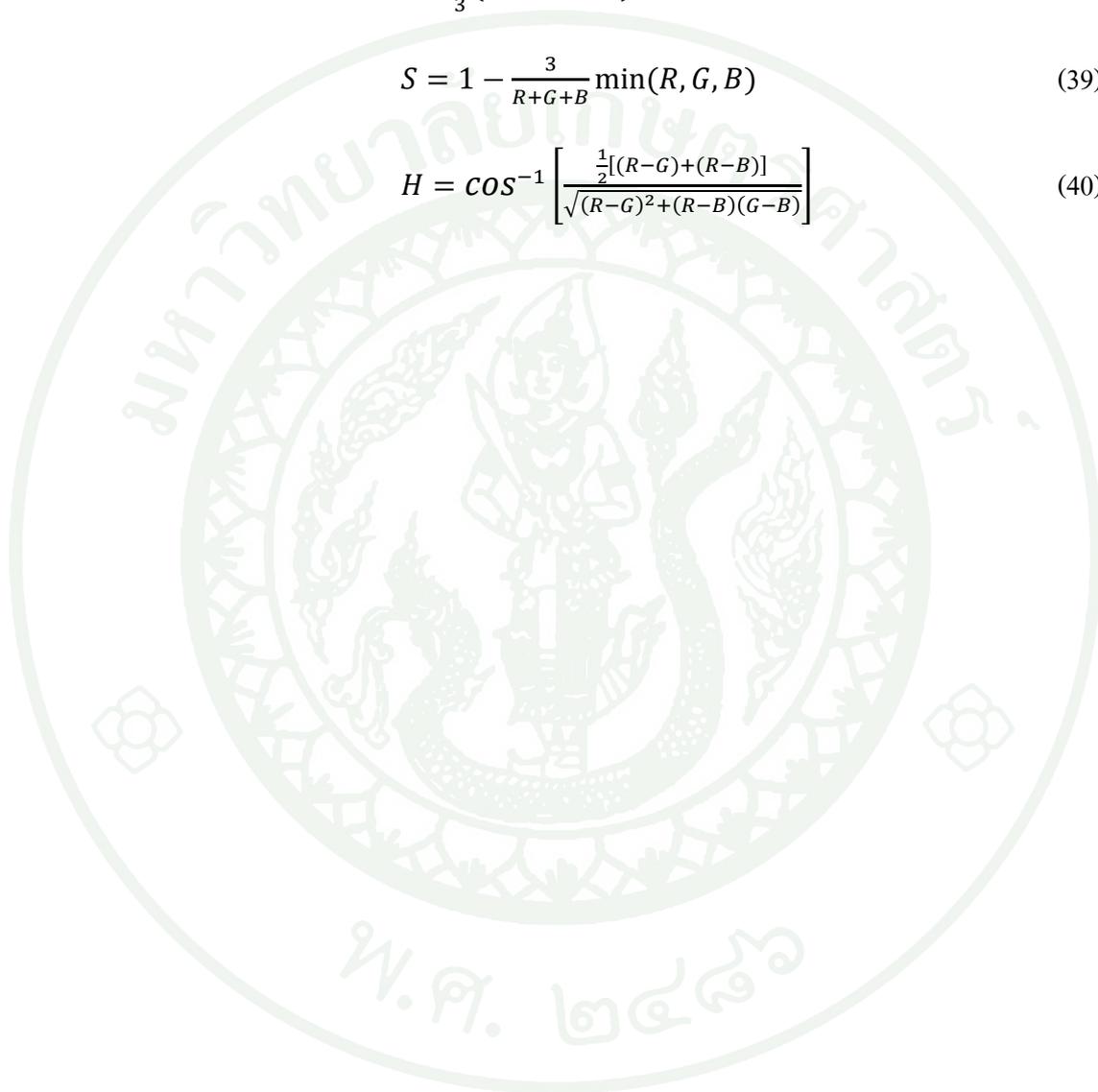
ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสี RGB และ HSI

เราสามารถแสดงการคำนวณค่า H, S, I เป็นฟังก์ชันของตัวแปร RGB ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (38)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} \min(R, G, B) \quad (39)$$

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}} \right] \quad (40)$$



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์รวมถึงการจัดทำเอกสาร
 - 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ Lenovo G460 Intel Core i5-460M 2.53 GHz Ram 4.0 GB
 - 1.2 โปรแกรม SolidWorks 2012 สำหรับใช้ในสร้างแบบจำลองสามมิติและวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์
 - 1.3 โปรแกรม Gambit 2.2.30 สำหรับการสร้างโดเมนจำลองการพันสีไข่
 - 1.4 โปรแกรม Ansys Fluent 13.0 สำหรับการวิเคราะห์บริเวณที่สติดเปลือกไข่
 - 1.5 โปรแกรม MATLAB R2009a ใช้สำหรับการวิเคราะห์บริเวณที่โคนน้ำของเปลือกไข่ในการทดลอง
 - 1.6 เครื่องพิมพ์ Inkjet Canon iP2770
 - 1.7 ปล่องลม สำหรับวัดความเร็วลม ดังแสดงในภาพที่ 19
 - 1.8 กระดาษสีดำด้านสำหรับเป็นฉากในการบันทึกภาพ
 - 1.9 กล้องดิจิทัล Nikon D90
 - 1.10 ห้องพันสี ขนาดกว้างยาวสูง $1 \times 1 \times 0.8$ m สำหรับใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ 20
 - 1.11 ลูกเหล็กทรงกลม สำหรับใช้ในการทดลองพันสี ดังแสดงในภาพที่ 21
2. เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ
 - 2.1 ส่วนไฟฟ้าและดอกสว่าน
 - 2.2 เครื่องเจียรไน
 - 2.3 ตะไบกลม ตะไบเหลี่ยม
 - 2.4 ประแจปากตาย
 - 2.5 ประแจหกเหลี่ยม
 - 2.6 ไคควงแฉก
 - 2.7 ไคควงแบน
 - 2.8 ค้อนเหล็ก
 - 2.9 ค้อนยาง
 - 2.10 คีมปากแหลม

- 2.11 คีมตัด
 - 2.12 ป้อนลม ขนาด 3 hp
 - 2.13 มีดคัตเตอร์
3. เครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
 - 3.1 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ค่าความละเอียด 0.05 mm ขนาด 200 mm
 - 3.2 ตลับเมตร ค่าความละเอียด 1 mm ความยาว 5,000 mm
 - 3.3 ไม้บรรทัดเหล็ก ค่าความละเอียด 0.5 mm ความยาว 300 mm
 - 3.4 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบแขวน ค่าความละเอียด 0.01 kg
 - 3.5 Pitot tube
 - 3.6 นาฬิกาจับเวลาดิจิตอล
 - 3.7 เทอร์โมมิเตอร์
 4. อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องพ่นสีไขเชื่อม
 - 4.1 มอเตอร์กระแสตรง 24 V 40 w พร้อมห้องเกียร์
 - 4.2 เหล็กแผ่นความหนาต่างๆ
 - 4.3 เหล็กเพลลาขาว
 - 4.4 แป้นเกลียวและสลักเกลียวขนาดต่าง ๆ
 - 4.5 ตลับลูกปืนขนาดต่าง ๆ
 - 4.6 โซ่และเฟืองโซ่
 - 4.7 พัดลม Hatari รุ่น HT-IS22M4 ขนาด 22 นิ้ว
 - 4.8 ล้ออุตสาหกรรม ขนาด 50 mm
 - 4.9 กระบอกลมขนาดต่างๆ
 - 4.10 โซลินอยด์วาล์ว 3/2 และ 5/3 ทาง
 - 4.11 Air Filter and regulator
 - 4.12 Flow Control Valve
 - 4.13 หัวสเปร์ย์ Laminar ST6-0.5
 - 4.14 สายพาน Timing
 - 4.15 Limit switch รุ่น AZ-7110 และ Z-15GM2-B
 - 4.16 สายลมขนาด 6 mm
 - 4.17 Linear Bushing

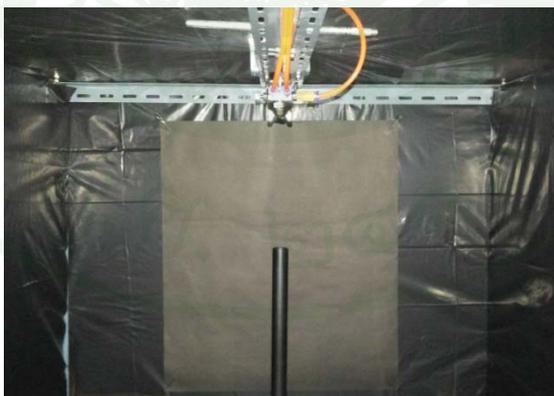
4.18 ลิ้ม

4.19 Idler สำหรับโซ่

4.20 ตู้ควบคุม



ภาพที่ 19 ปล่องลม สำหรับวัดความเร็วลม



ภาพที่ 20 ห้องพ่นสีจำกัดแสง ขนาดกว้างยาวสูง $1 \times 1 \times 0.8$ m สำหรับใช้ในการทดลองพ่นน้ำลงบนลูกเหล็กทรงกลม เพื่อนำผลที่ได้มาประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

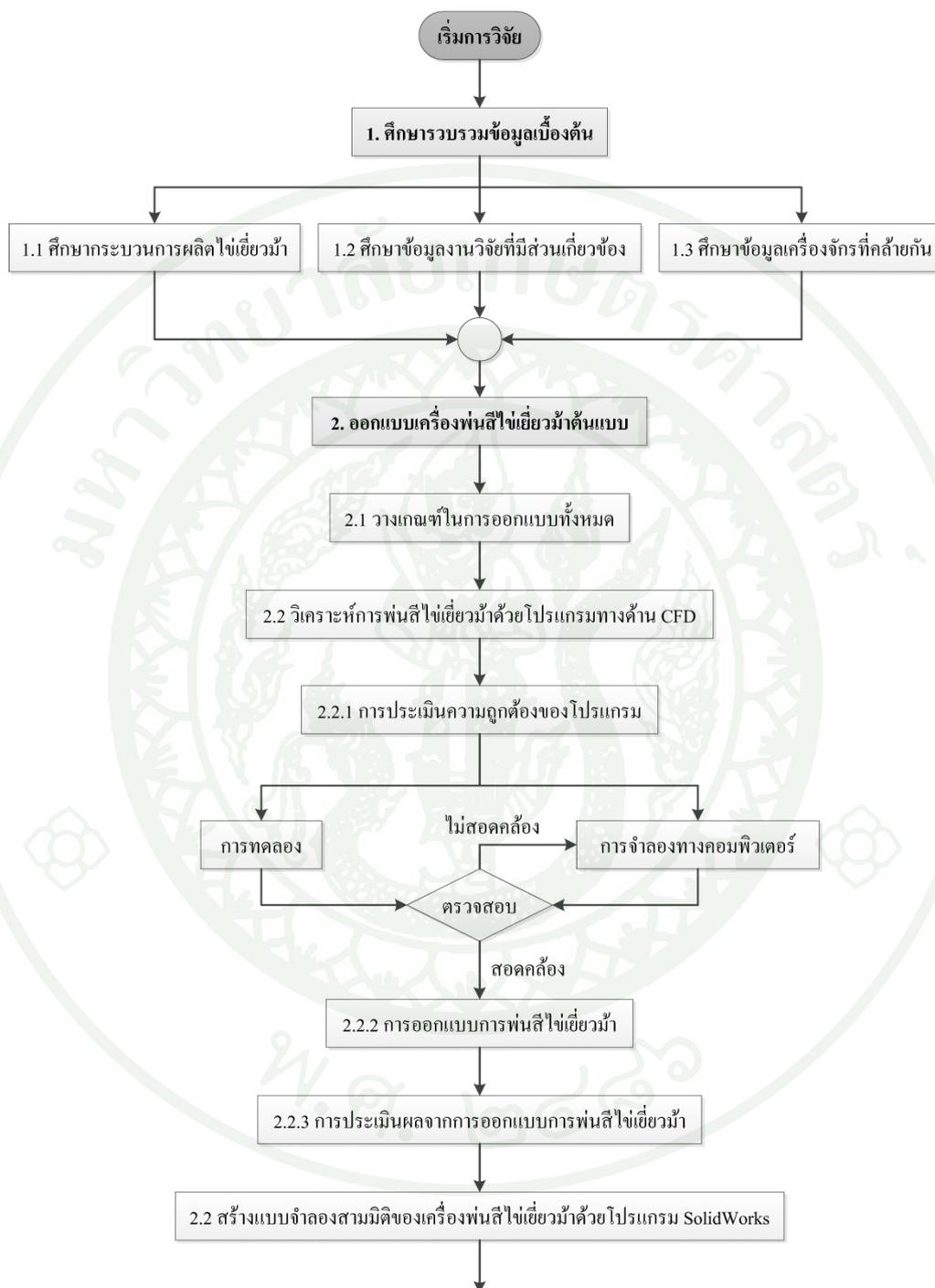


ภาพที่ 21 ลูกเหล็กทรงกลม สำหรับใช้ในการทดลองพ่นสี

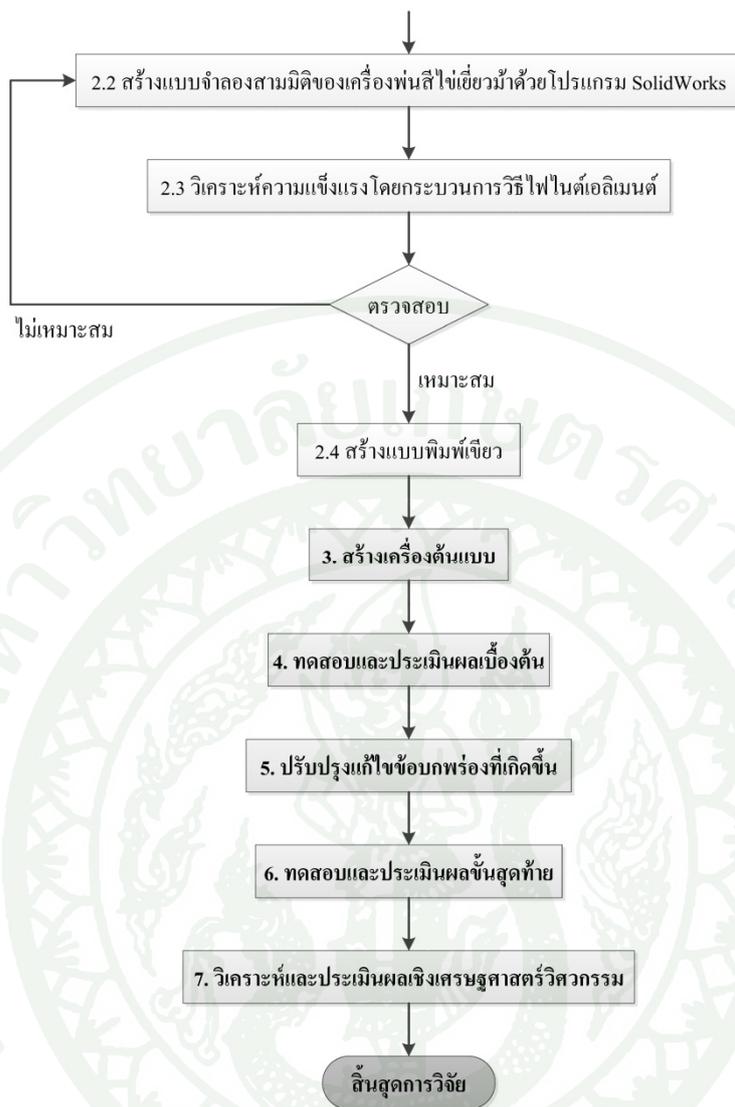


ภาพที่ 22 เครื่องมือชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

วิธีการ



ภาพที่ 23 แผนผังวิธีการวิจัย



ภาพที่ 23 (ต่อ)

จากภาพที่ 23 แสดงกระบวนการและวิธีวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 7 ส่วน โดยแต่ละขั้นตอนสามารถแยกอธิบายได้ดังนี้

1. ศึกษารวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ

เป็นการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วน เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการนำมาออกแบบรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ประกอบการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา โดยมีการกำหนดขั้นตอนดังนี้คือ

1.1 ตำรวจและศึกษากระบวนการผลิตไข่ม้วนจากผู้ประกอบการ เพื่อเก็บข้อมูลไปใช้ในการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วนให้สอดคล้องกับสถานะการทำงานของผู้ประกอบการ พร้อมทั้งตรวจสอบปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

1.2 ศึกษาหาข้อมูลเครื่องจักรที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเครื่องพ่นสีไข่ม้วน เพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบต่างๆ และนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วน

2. ออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วนต้นแบบ

นำข้อมูลที่ได้ทำการรวบรวมข้างต้นนำมาทำการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วนตามเกณฑ์และขอบเขตของงานวิจัยที่ได้กำหนดมาในเบื้องต้น โดยจะแยกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ 1) ชุดพลิกไข 2) ชุดเป่าแห้งสี 3) สายพานลำเลียง 4) ชุดพ่นสี โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้ คือ

2.1 วางเกณฑ์ในการออกแบบทั้งหมด

2.2 วิเคราะห์การพ่นสีไข่ม้วนด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD

เป็นการศึกษาการกระจายตัวของสีที่พ่นลงบนไข่ม้วน โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) มาช่วยในการวิเคราะห์ และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบชุดพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่ม้วน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลักๆ ได้ 3 ส่วน คือ การประเมินความถูกต้องของโปรแกรม การจำลองการพ่นสีไข่ม้วน และการประเมินผลจากการจำลองการพ่นสีไข่ม้วน

2.2.1 การประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

ในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

การทดลองเพื่อทดสอบผลที่ได้จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ในส่วนของการทดลองนั้นจะทำการจำลองการพ่นน้ำลงบนลูกเหล็กทรงกลม เพื่อที่จะวัดบริเวณที่ลูกเหล็กโดนพ่นน้ำ และนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินความถูกต้อง

ชุดทดลองพ่นน้ำบนลูกเหล็กทรงกลมสร้างจากเหล็กฉาก โดยมีขนาดกว้าง 1 m ยาว 1 m และสูง 0.8 m โดยในที่นี้จะเรียกว่าห้องพ่นน้ำซึ่งดูได้จากภาพที่ 18 ห้องคลุมด้วยแผ่นพลาสติกสีดำทึบแสง เพื่อควบคุมปริมาณแสง โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 36 W จำนวน 1 หลอดเป็นตัวให้แสงสว่าง จัดวางหัวสเปร์ย Laminar ST6-0.5 ซึ่งมีขนาดรูของหัวฉีด (orifice) 0.5 mm ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของห้อง ที่ด้านล่างตำแหน่งตรงกับหัวสเปร์ย มีลูกเหล็กทรงกลมสีชมพูที่นำมาพ่นน้ำวางอยู่บนโต๊ะระยะห่างจากหัวสเปร์ย 200 mm โดยลูกเหล็กมีขนาด 41.5 mm ด้านหลังเป็นกระดาษสีดำด้านเพื่อใช้เป็นการบันทึกภาพ ภาพลูกเหล็กที่ถูกพ่นน้ำแล้วจะถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิทัล Nikon D90 โดยกล้องจะถูกติดตั้งไว้ตั้งฉากกับพื้นห้องพ่นน้ำ

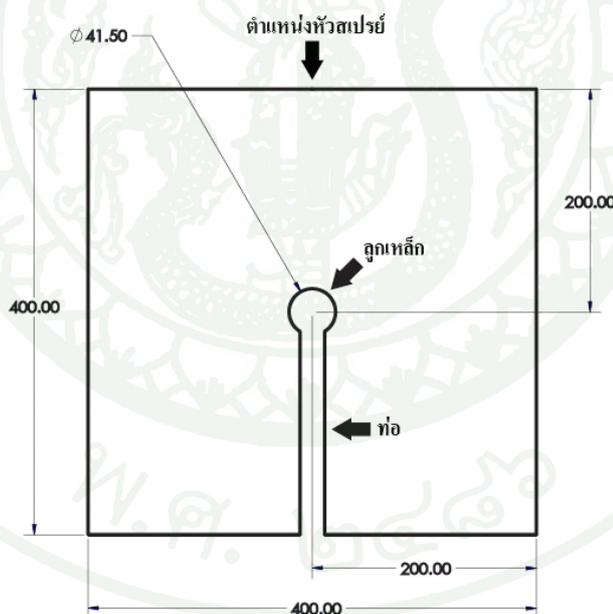
จากนั้นทำการทดลองพ่นน้ำบนลูกเหล็ก โดยกำหนดลมที่ใช้กับหัวสเปร์ยไว้ที่ 100 MPa และทำการบันทึกภาพหลังจากที่ลูกเหล็กโดนพ่นน้ำแล้ว โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 7 ครั้ง ซึ่งในการบันทึกภาพนั้น บริเวณที่ทำการบันทึกภาพจำเป็นต้องถูกจำกัดแสงจากภายนอก เพื่อให้ได้ภาพที่มีแหล่งกำเนิดแสงแหล่งเดียวกัน โดยให้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เท่านั้น ภาพที่บันทึกจะถูกนำมาวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมด้าน Image analyzer เพื่อหาบริเวณที่ลูกเหล็กโดนพ่นน้ำ

การศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณหรือ CFD ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์การพ่นสีไข่เยี่ยวม้า โดยขั้นตอนการเตรียมประมวลผลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ประกอบไปด้วย

การสร้างขอบเขต (Domain) การสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติ (Grid Generation) และ การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบและค่าเริ่มต้น ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมา จะทำในโปรแกรม Gambit ส่วนโปรแกรม Ansys (Fluent) จะใช้สำหรับการคำนวณการไหลเชิงคำนวณ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสีที่เกาะบริเวณเปลือกไข่ และนำไปออกแบบชุดฟันสีไข่

ทำการสร้างขอบเขตหรือแบบจำลองสองมิติของการพ่นน้ำลงบนลูกเหล็กทรงกลม โดยทำการสร้างกรอบขนาด 400×400 mm กำหนดให้ตำแหน่งของหัวสเปร์ย์อยู่ตรงกลางบริเวณด้านบนของกรอบและให้ลูกเหล็กอยู่ด้านล่างตำแหน่งตรงกับหัวสเปร์ย์โดยวางลูกเหล็กบนท่อที่ระยะห่างจากหัวสเปร์ย์ 200 mm โดยดูได้จากภาพที่ 24 หลังจากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ มาทำการสร้างเป็นแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติโดยใช้โปรแกรม Gambit รูปแบบการแบ่งโดเมนเป็นแบบ unstructured tetrahedral ได้จำนวนชิ้นส่วนประกอบประมาณ 600,000 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยการสร้างแบบจำลองโครงสร้างตาข่ายจะเน้นไปที่บริเวณผิวของลูกเหล็ก เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น



ภาพที่ 24 แบบจำลองสองมิติของการพ่นน้ำลงบนลูกเหล็กทรงกลม (หน่วยเป็น mm)

หลังจากได้แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแล้วได้ทำการกำหนดรูปแบบเงื่อนไขขอบเขตให้กับโดเมนที่จะทำการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 25 เพื่อนำไปทำการคำนวณต่อในโปรแกรม Fluent โดยในขั้นตอนการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Fluent จะใช้แบบจำลอง

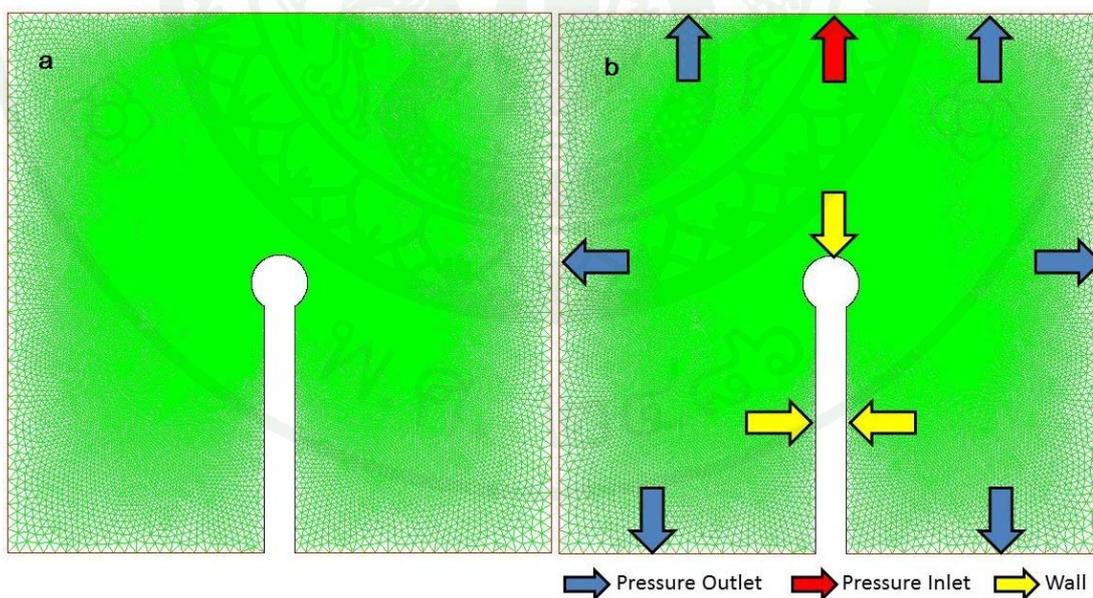
การไหลที่เรียกว่า Discrete phase model ซึ่งจะพิจารณาบนระบบที่เรียกว่า Lagrangian method โดยมีข้อกำหนดต่าง ๆ ดังนี้

- เป็นการไหลแบบปั่นป่วนและมีอนุภาคอื่นผสมอยู่ในอัตราส่วนเชิงปริมาตรน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด โดยการไหลที่เกิดขึ้นเป็นแบบสภาวะคงที่

- แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศจะใช้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navierstokes equations) และแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \epsilon$ โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

- แบบจำลองการไหลของการพ่นน้ำจะใช้แบบจำลองแบบ Stochastic tracking with Discrete Random Walk (DRW)

- กำหนดให้น้ำมีขนาดอนุภาค $5 \mu\text{m}$ จะถูกฉีดเข้าไปยังห้องพ่นสีด้วยอัตราการไหลโดยมวล 0.001034 kg/s จากกึ่งกลางของห้องพ่นสี



ภาพที่ 25 แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติ (a) และขอบเขตของกรอบการพ่นน้ำ (b)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำหรับพิจารณาการไหลของของไหลหลักหรืออากาศก่อน แล้วจึงนำผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการพิจารณาการไหลของของไหลรองหรือน้ำ โดยรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สภาวะเงื่อนไขขอบเขต

| Boundary | Continuous phase | Discrete phase |
|--------------|----------------------------|---|
| Spray Nozzle | Pressure inlet 100,000 kPa | Pressure inlet with 5 μm size and 0.001034 kg/s of spray water |
| Outlet | Pressure outlet 0 kPa | Pressure outlet 0 kPa and set to escape zone |
| Sphere | Wall | Wall and set to trap zone |
| Pipe | Wall | Wall and set to trap zone |

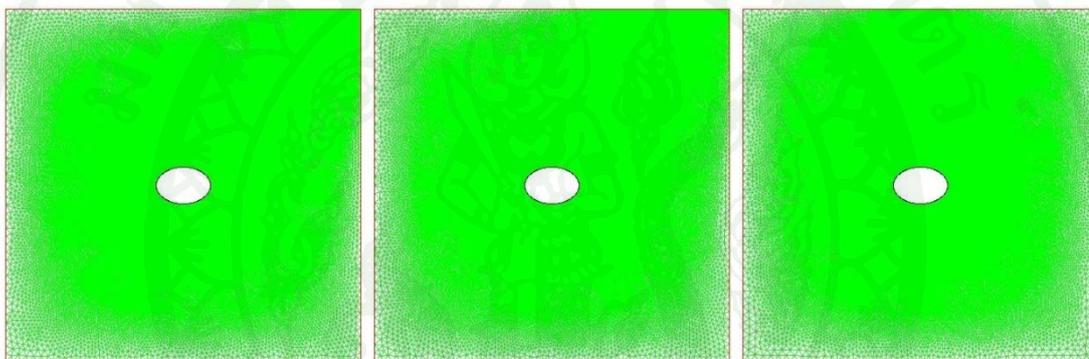
หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับ การจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยการเปรียบเทียบพื้นที่บริเวณที่ลูกเหล็กถูกพ่นน้ำเพื่อประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

2.2.2 การจำลองการพ่นสีไข่ม้วน

หลังจากการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม ได้ทำการจำลองการพ่นสีไข่ม้วนที่ห้องสาขาของหัวสเปรย์แตกต่างกัน ได้แก่ 45 60 และ 90 องศาอ้างอิงจากแนวแกนนอน ดังแสดงในภาพที่ 26 จากนั้นดำเนินการสร้างแบบจำลองการพ่นสีที่ห้องสาขาต่าง ๆ โดยใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับการศึกษาในส่วนของ การประเมินความถูกต้องของโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้น แต่แทนที่ท่อและลูกเหล็กทรงกลม ด้วยวงรีซึ่งในที่นี้เปรียบให้เหมือนไข่ม้วน และนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมอีกครั้ง



ภาพที่ 26 การพ่นสีไข่ม้วนที่ทำกรวิเคราะห์ โดยกำหนดดองศาของหัวสเปร์ย์เป็น 45 60 และ 90 องศาตามลำดับโดยอ้างอิงจากแนวแกนนอน



ภาพที่ 27 แบบจำลองโครงสร้างตาข่ายแบบสองมิติของการพ่นสีไข่ม้วนในมุมที่แตกต่างกัน

2.2.3 การประเมินผลจากการออกแบบการพ่นสีไข่ม้วน

หลังจากวิเคราะห์ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้ว นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกันโดยพิจารณาจากสีที่เกาะตัวบนเปลือกไข่ แล้วใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชุดพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่ม้วน

2.3 สร้างแบบจำลองและภาพการประกอบแบบจำลอง (Part and Assembly) ของชิ้นงานย่อยทุกชิ้น โดยใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ SolidWorks

2.4 วิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องพ่นสีไข่ม้วนที่ได้ออกแบบขึ้นมาโดยกระบวนการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.5 สร้างแบบพิมพ์เขียว (Drawing) จากแบบจำลองและภาพการประกอบแบบจำลอง

3. สร้างเครื่องต้นแบบ

ดำเนินการสร้างเครื่องฟันทึ๋ไข่เยื่อว้ตามแบบพิมพ์เขียวที่จัดท้ไว้ในข้อ 2

4. ทดสอบและประเมินผลเบื้องต้น

ทดสอบและประเมินผลการทำงานของเครื่องฟันทึ๋ไข่เยื่อว้ต้นแบบที่ด้ทำการสร้างขึ้นมาตามเกณฑ์การออกแบบที่ด้วางไว้

5. ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น

ทำการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการทดสอบในข้อ 4

6. ทดสอบและประเมินผลขั้นสุดท้าย

ทำการทดสอบและประเมินผลในขั้นตอนสุดท้ายหลังจากการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง

7. วิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ทำการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เช่นการคำนวณต้นทุน และจุดคุ้มทุน

ผลและวิจารณ์

1. ผลการศึกษารวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบ

1.1 ผลสำรวจและศึกษากระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าจากผู้ประกอบการ

จากการสำรวจกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าจากผู้ประกอบการพบว่า หลังจากไข่ผ่านกรรมวิธีการหมักแล้ว จะใช้แรงงานคนนำไข่มาวางลงบนตะแกรงขนาดใหญ่เพื่อพ่นสีดังกล่าวที่ 28 ซึ่งจะทำให้การพ่นสีสองด้าน คือด้านบนและด้านล่างของไข่ โดยครั้งแรกจะทำการพ่นสีไข่ด้านบน แล้วรอให้แห้งเพื่อที่จะพ่นซ้ำอีกครั้ง หลังจากนั้นรอให้แห้งแล้วพลิกไข่เพื่อพ่นสีด้านล่าง ที่ด้านล่างของไข่จะถูกพ่นสีและรอให้แห้งแล้วพ่นสีครั้งที่สอง แล้วรอให้แห้งอีกครั้งก่อนที่จะไปบรรจุลงกล่อง



ภาพที่ 28 ตะแกรงสำหรับวางไข่เพื่อพ่นสี

จากการสอบถามจากผู้ประกอบการและผู้ปฏิบัติงาน ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ ในช่วงฤดูฝนสีจะแห้งช้า ทำให้อัตราการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการ อีกทั้งการใช้แรงงานคนยังก่อให้เกิดปัญหาตามมาคือ สีที่พ่นลงบนเปลือกไข่ไม่สม่ำเสมอ เช่น ความหนาของสีไม่สม่ำเสมอ พ่นสีครอบคลุมไม่ทั่วทั้งฟอง การพ่นสีมากเกินไปทำให้สีไหลเยิ้ม จากปัญหาที่กล่าวมาจึงต้องนำไข่ที่พ่นสีแล้วมาแก้ไขและพ่นสีใหม่อีกครั้ง ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและแรงงาน

และจากการสำรวจขนาดของไข้เยี่ยวม้าจากทางผู้ประกอบการโดยการสุ่มวัดขนาดของไข้จำนวน 100 ฟอง พบว่าไข้เยี่ยวม้ามีความยาวมากที่สุด 66.6 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด 46.7 mm

1.2 ผลการศึกษาหาข้อมูลเครื่องจักรที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเครื่องฟั่นสีไข้เยี่ยวม้า

จากการศึกษาหาข้อมูลเครื่องฟั่นสีไข้เยี่ยวม้าพบว่ายังไม่มีผู้ทำเครื่องจักรประเภทนี้มาก่อน จึงได้ทำการค้นคว้าข้อมูลของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไข้ และกระบวนการฟั่นสีแทน

จากการสำรวจเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตไข้พบว่ามีการใช้เครื่องจักรหลายประเภท อาทิเช่น เครื่องคัดแยกขนาดไข้ เครื่องล้างไข้ เครื่องตรวจสอบรอยร้าวไข้ เครื่องบรรจุไข้ ลงบรรจุภัณฑ์ เครื่องปอกไข้ เครื่องคัดแยกไข้ขาวและไข้แดง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วในเครื่องจักรที่กล่าวมาข้างต้น การลำเลียงไข้จะใช้สายพาน ระบบสุญญากาศ และลูกกลิ้งที่มีลักษณะคล้ายหลอดด้ายในการลำเลียงไข้

และจากการศึกษาเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับการฟั่นสีพบว่า การฟั่นสีชิ้นงานสามารถแบ่งได้เป็นการฟั่นสีชิ้นงานด้านเดียว และการฟั่นสีชิ้นงานโดยรอบ ซึ่งจากการสำรวจวิธีการฟั่นสีของเครื่องจักรพบว่ามี 2 วิธีคือ การให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านหัวสเปรย์ฟั่นสีที่อยู่กับที่ และแบบที่ชิ้นงานอยู่กับที่แล้วหัวสเปรย์ฟั่นสีเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน

โดยการศึกษาข้อมูลเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไข้ และกระบวนการฟั่นสีที่กล่าวมาในข้างต้นจะถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องฟั่นสีไข้เยี่ยวม้าต้นแบบ

2. ผลการออกแบบเครื่องฟั่นสีไข้เยี่ยวม้าต้นแบบ

2.1 ผลการวางแผนฯในการออกแบบทั้งหมด

จากการศึกษากระบวนการผลิตไข้เยี่ยวม้าและปรึกษากับทางผู้ประกอบการถึงขอบเขตและแนวทางในการสร้างเครื่องฟั่นสีไข้เยี่ยวม้าต้นแบบ มีเกณฑ์ในการออกแบบดังนี้

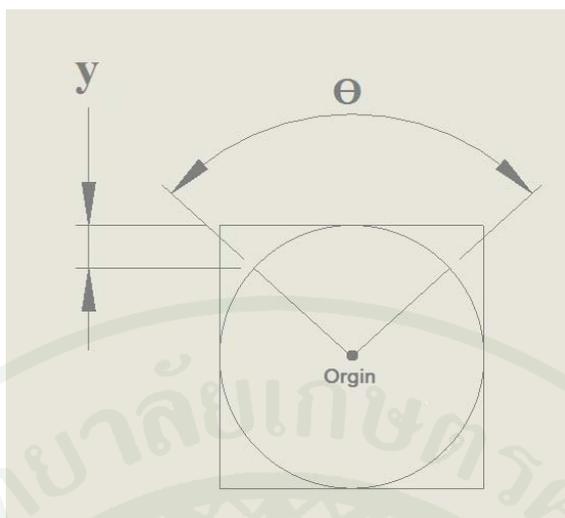
- เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบต้องมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 30,000 ฟองต่อวันหรือ 3,750 ฟองต่อชั่วโมงโดยคิดจากชั่วโมงทำงานจำนวน 8 ชั่วโมงต่อวัน
- เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบสามารถพ่นสีไข่ได้ครบทั้งฟองและมีความสม่ำเสมอ
- กลไกการทำงานสามารถทำงานง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนเกินไป และผู้ปฏิบัติงานสามารถปฏิบัติงานได้สะดวก
- การบำรุงรักษาต่ำ หากมีการชำรุดของอุปกรณ์สามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย และมีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด
- งบประมาณในการสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบต้องอยู่ในงบประมาณที่กำหนดไว้

2.2 ผลการวิเคราะห์การพ่นสีไข่เยี่ยวม้าด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD

จากการศึกษาการกระจายตัวของสีที่พ่นลงบนไข่เยี่ยวม้าโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ผลการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม ผลการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้า และผลการประเมินจากการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

2.2.1 ผลการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม

ผลการประเมินความถูกต้องของโปรแกรมนี้นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และการทดลองเพื่อตรวจสอบผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยการเปรียบเทียบบริเวณที่ถูกพ่นน้ำซึ่งจะถูกคำนวณออกมาในค่าของมุม θ ดังแสดงในรูปที่ 29 ซึ่งค่ามุม θ นี้สามารถคำนวณได้จากค่า y ซึ่งเป็นบริเวณที่โดนพ่นน้ำโดยสมบรูณ์อ้างอิงจากแนวแกนตั้ง



ภาพที่ 29 การคำนวณหาบริเวณที่ถูกพ่นน้ำในรูปของมุม θ

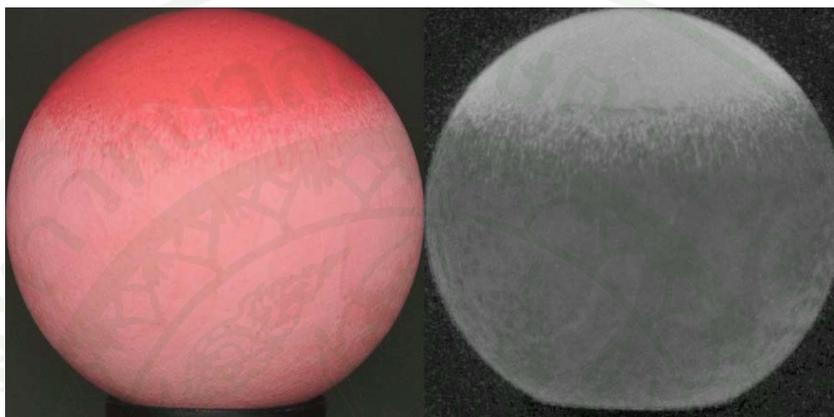
ผลการทดลองเพื่อทดสอบผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ในส่วนของการทดลอง ลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วจะถูกบันทึกภาพ ดังแสดงในภาพที่ 30 จากภาพจะเห็นว่าส่วนที่ถูกพ่นน้ำจะเป็นสีชมพูเข้มและส่วนที่ไม่ถูกพ่นน้ำจะเป็นสีชมพูอ่อน โดยภาพที่บันทึกได้จะนำมาวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมด้าน Image analyzer โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB R2009a



ภาพที่ 30 ลูกเหล็กหลังจากพ่นน้ำ

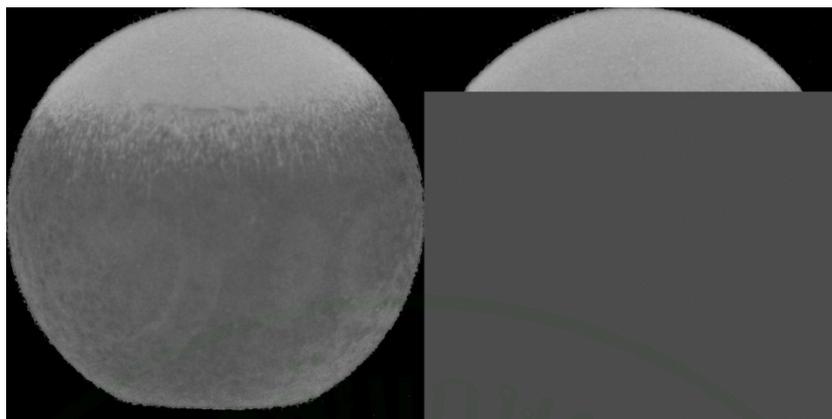
ในขั้นตอนแรกภาพลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วจะถูกนำเข้าโปรแกรม MATLAB ในระบบสี RGB เนื่องจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในระบบสี RGB มีความซับซ้อนในการคำนวณมาก ดังนั้นภาพจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในระบบสี HSV ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งโดยในระบบสีนี้ เป็นการพิจารณาสีโดยใช้ Hue Saturation และ Value ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า Saturation เนื่องจากสามารถเห็นความแตกต่างระหว่างบริเวณที่โดนและไม่โดนพ่นน้ำได้ชัดเจน



ภาพที่ 31 ภาพลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วในระบบสี RGB (ด้านซ้าย) ระบบสี HSV (ด้านขวา)

หลังจากแปลงภาพให้อยู่ในระบบสี HSV แล้ว ได้ทำการเฉลี่ยค่า Saturation ของบริเวณที่ถูกพ่นน้ำอย่างเห็นได้ชัด และนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการหาค่า y ซึ่งเป็นบริเวณที่โดนพ่นน้ำโดยสมบูรณ์ เริ่มจากการตัดภาพพื้นหลังส่วนที่ไม่ใช่ลูกเหล็กออกให้เป็นสีดำซึ่งมีค่า Saturation เท่ากับ 0 (สีขาวมีค่าเท่ากับ 1) ดังแสดงในภาพที่ 32 ด้านซ้าย จากนั้นทำการเฉลี่ยค่า Saturation ของแต่ละ pixel ในแถวแกนนอน แถวที่มีค่าเฉลี่ย Saturation ต่ำกว่าเกณฑ์จะถูกตัดออกเป็นสีเทาเข้มดังแสดงในภาพที่ 32 ด้านขวา ดังนั้นจะได้ค่า y จากตำแหน่งของแถวสุดท้ายที่ไม่ถูกตัดเป็นสีเทา

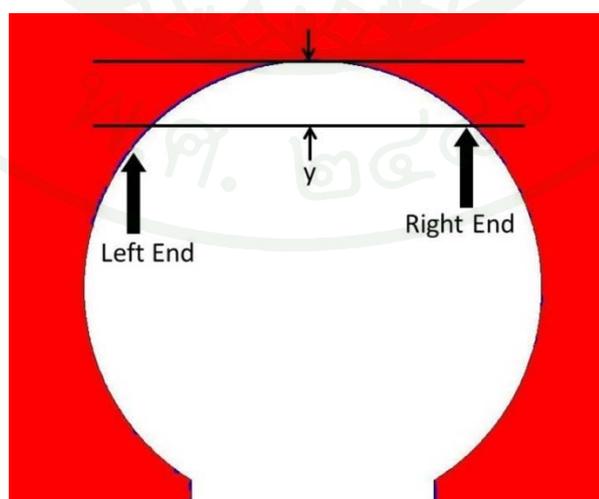
หลังจากได้ค่า y จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB แล้ว ก็จะสามารถนำมาคำนวณหาบริเวณที่ถูกพ่นน้ำจากการทดลองในรูปของมุม θ ได้ ดังแสดงในภาพที่ 29 โดยมุม θ ที่ได้มีค่าเท่ากับ 85.91 องศา



ภาพที่ 32 ภาพลูกเหล็กที่พ่นน้ำแล้วในระบบสี HSV หลังจากตัดพื้นหลังออกเป็นสีดำ (ด้านซ้าย)
ภาพบริเวณที่โดนพ่นน้ำโดยสมบูรณ์ (ด้านขวา)

ผลการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

จากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะสามารถหาค่ามุม θ ได้จากภาพการเกาะตัวของน้ำที่ลูกเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 33 จากภาพจะพบว่าน้ำที่เกาะบนลูกเหล็กทางด้านซ้ายและด้านขวาไม่เท่ากัน ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่า y ซึ่งเป็นบริเวณที่โดนพ่นน้ำโดยสมบูรณ์ อ้าอิงจากแกนนอน ตำแหน่งของบริเวณที่ไม่ถูกพ่นน้ำที่สูงที่สุดจะถูกนำมาหาค่า y และนำไปคำนวณมุม θ ต่อไป โดยมุม θ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับ 92.57 องศา

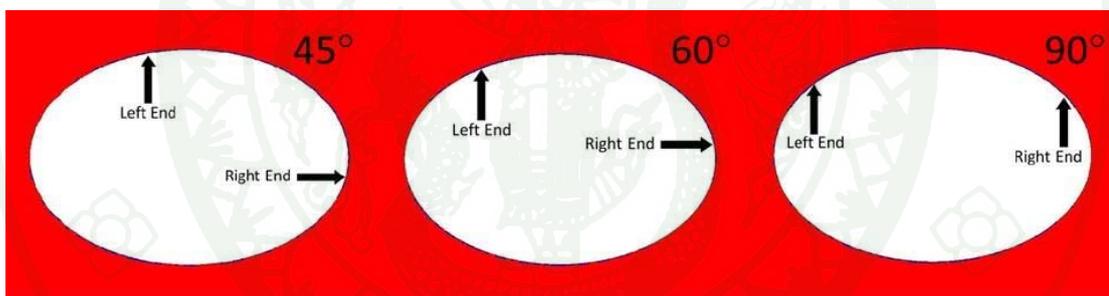


ภาพที่ 33 การเกาะตัวของน้ำที่ลูกเหล็กจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมื่อเปรียบเทียบค่ามุม θ ที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน 7.97% ดังนั้นจากการเปรียบเทียบข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการทำนายการเกาะตัวของสปีบนเปลือกไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.1 ผลการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

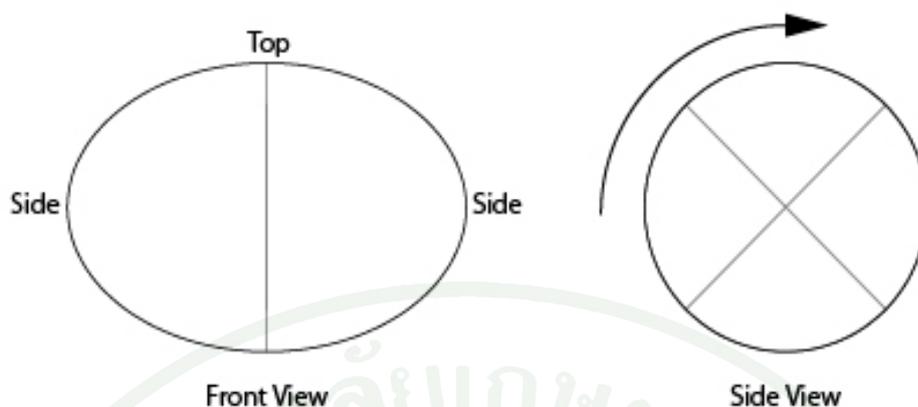
หลังจากการประเมินความถูกต้องของโปรแกรม ได้ทำการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ห้องของหัวสเปร์ย์แตกต่างกัน ได้แก่ 45 60 และ 90 องศาโดยอ้างอิงจากแนวแกนนอน ผลจากการจำลองการพ่นสีที่ห้องต่าง ๆ พบว่า ที่มุมหัวสเปร์ย์ 90 องศาโดยส่วนมากสีจะติดบริเวณด้านบนของเปลือกไข่ ส่วนที่ 45 และ 60 องศาสีจะติดที่บริเวณด้านบนของเปลือกไข่และด้านข้างของเปลือกไข่ด้านเดียวกับตำแหน่งของหัวสเปร์ย์ แต่ที่มุมหัวสเปร์ย์ 45 องศาสามารถติดด้านข้างของเปลือกไข่ได้มากกว่าที่ 60 องศา ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การเกาะตัวของสปีบนเปลือกไข่การจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ห้องของหัวสเปร์ย์ต่าง ๆ

2.2.2 ผลการวิเคราะห์จากการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

จากผลการจำลองการพ่นสีไข่เยี่ยวม้าข้างต้น สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าให้สามารถพ่นสีไข่ได้ครบทั้งฟอง โดยต้องออกแบบให้สีถูกพ่นจากด้านบนของไข่ และเพื่อให้ไข่ถูกพ่นสีครบทั้งฟอง ไข่จะถูกแบ่งเป็น 4 ส่วนเมื่อมองจากด้านข้างดังแสดงในภาพที่ 35 ดังนั้นจะต้องทำการพ่นสีทั้งหมด 4 ครั้ง โดยการพ่นสีแต่ละครั้งจะพ่นสีจากทางด้านซ้ายและขวาที่มุมของหัวสเปร์ย์ 45 องศาเพื่อให้สีครอบคลุมด้านบนและด้านข้างของไข่ทั้งสองข้าง จากนั้นไข่จะถูกเป่าแห้งและหมุนเพื่อที่จะพ่นสีส่วนต่อไปจนครบ

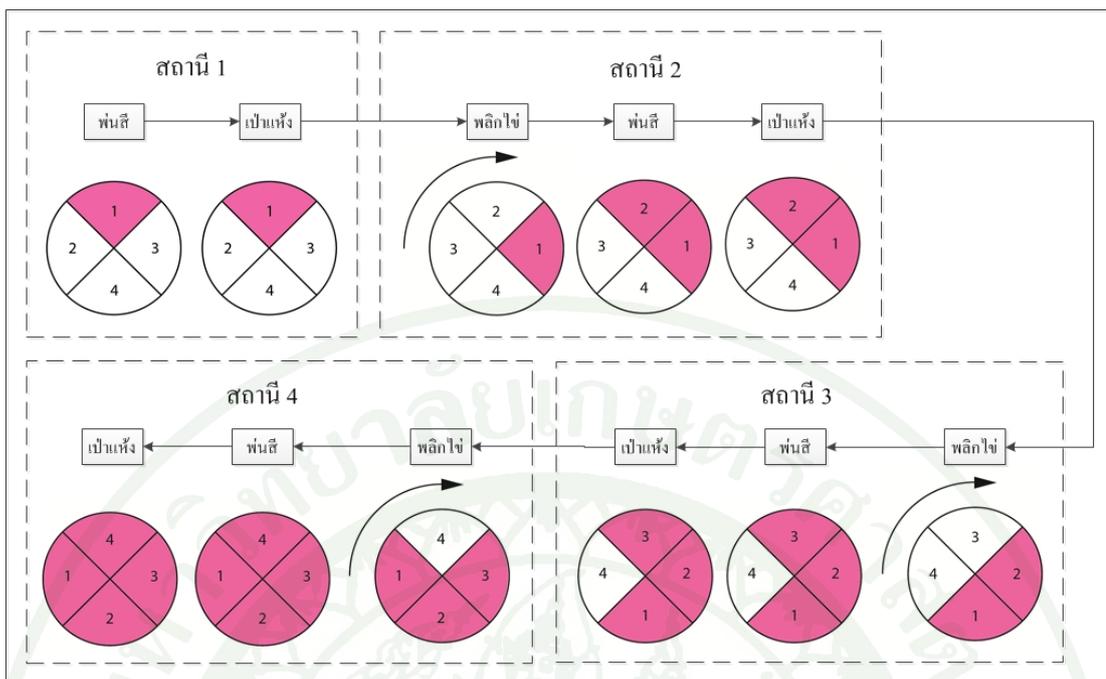


ภาพที่ 35 การแบ่งพื้นที่พัดสีบริเวณเปลือกไขเป็นส่วน ๆ เพื่อให้พัดสีไขได้ครบทั้งฟอง

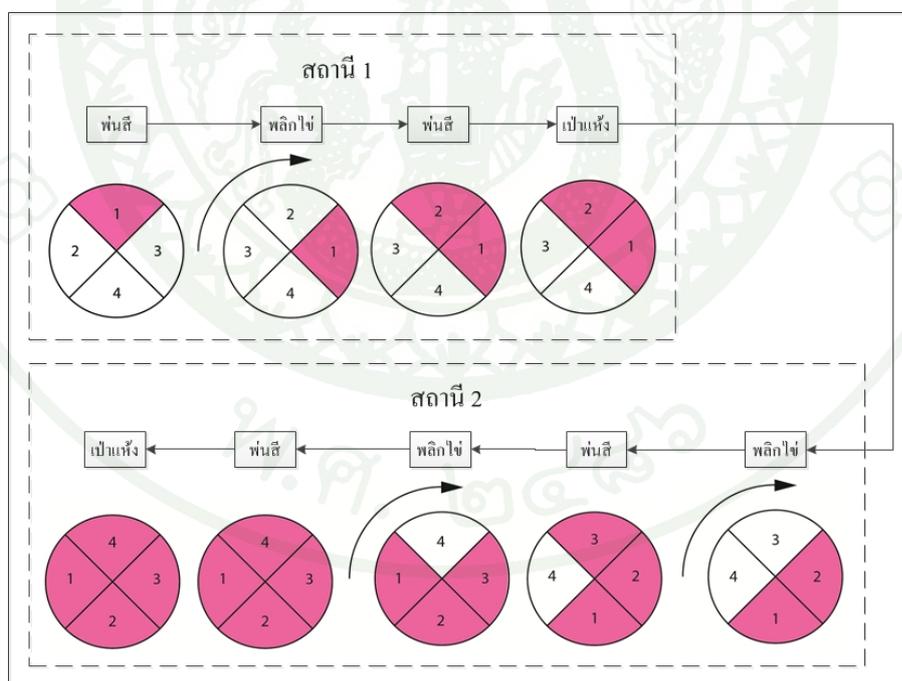
2.3 ผลการออกแบบและการสร้างแบบจำลองสามมิติของเครื่องพัดสีไขเยียวม้า

จากการประเมินผลจากการจำลองการพัดสีไขเยียวม้าด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลเชิงคำนวณ เครื่องพัดสีไขเยียวม้าต้นแบบถูกออกแบบให้มีหลักการทำงานดังนี้ ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 4 ส่วนคือ ชุดพัดสีไข ชุดพลิกไข ชุดเป่าแห้งสี และสายพานลำเลียง จากผลการประเมินการจำลองการพัดสีจะเห็นว่าตัวเครื่องควรจะออกแบบให้มี 4 สถานีเพื่อที่จะพัดสีให้ครบทั้ง 4 ด้าน โดยในสถานีแรกไขจะถูกพัดสีและเป่าแห้ง สถานีที่สอง สาม และสี่ ไขจะถูกพลิกพัดสี และเป่าแห้ง แล้วลำเลียงออกมาโดยสายพาน

จากขั้นตอนการทำงานของเครื่องพัดสีไขเยียวม้าในภาพที่ 36 จะเห็นว่าเครื่องพัดสีไขเยียวม้ามีสถานีจำนวน 4 สถานี โดยแต่ละสถานีจะประกอบไปด้วยชุดพัดสี ชุดพลิกไข และชุดเป่าแห้ง ทำให้ตัวเครื่องมีขนาดใหญ่และมีต้นทุนในการสร้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดขนาดของตัวเครื่องและต้นทุนในการสร้างจึงทำการออกแบบขั้นตอนการทำงานของเครื่องพัดสีไขเยียวม้าใหม่ดังภาพที่ 37 จะเห็นว่าตัวเครื่องจะเหลือเพียง 2 สถานีแต่ยังสามารถที่จะพัดสีไขได้ครบทั้งฟอง โดยในสถานีแรกจะพัดสีไขด้านที่หนึ่ง จากนั้นทำการพลิกไขเพื่อพัดสีด้านที่สองแล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นไขจะถูกลำเลียงเข้าสู่สถานีที่สองแล้วทำการพลิกไขเพื่อพัดสีด้านที่สาม เมื่อพัดสีด้านที่สามแล้วไขจะถูกพลิกอีกครั้งเพื่อพัดสีด้านที่สี่ซึ่งเป็นด้านสุดท้าย จากนั้นทำการเป่าแห้งและลำเลียงออก



ภาพที่ 36 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพิมพ์สี่สีเชื่อมมาจากการประเมินการจำลองการพิมพ์



ภาพที่ 37 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพิมพ์สี่สีเชื่อมมาที่ออกแบบใหม่เพื่อลดขนาดของเครื่อง

จากขั้นตอนการทำงานของเครื่องพิมพ์สี่สีเชื่อมมาข้างต้น นำมาสร้างแบบจำลองและภาพการประกอบแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม

SolidWorks ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวสามารถนำผลจากการออกแบบมาทดสอบความแข็งแรงได้ โดยสามารถแบ่งการออกแบบได้เป็น 4 ส่วนดังต่อไปนี้

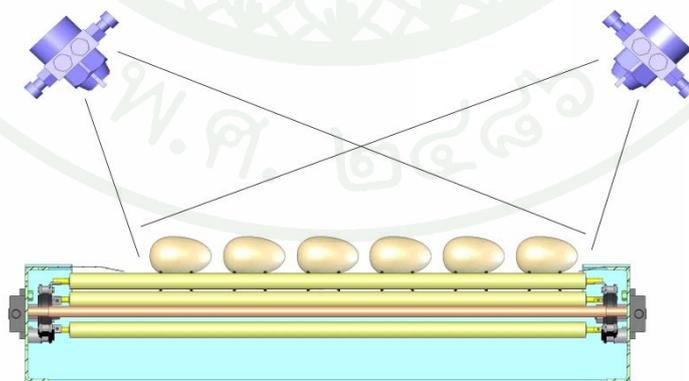
- 2.3.1) การออกแบบชุดฟันสี
- 2.3.2) การออกแบบชุดพลิกไข่
- 2.3.3) การออกแบบชุดเป่าแห้งสี
- 2.3.4) การออกแบบสายพานลำเลียง

โดยการออกแบบในแต่ละส่วนของเครื่องฟันสีไข่เยี่ยวม้า สามารถแสดงรายละเอียดของการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 ผลการออกแบบชุดฟันสี

การทดสอบการฟันสี

จากผลการจำลองการฟันสีไข่เยี่ยวม้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ข้างต้น ได้ทำการทดลองฟันสีไข่เพื่อดูการเกาะตัวของสีที่เปลือกไข่ของการฟันสีที่ได้ออกแบบไว้ โดยเริ่มแรกได้ออกแบบให้ฟันสีโดยหัวสปรีย์จำนวน 2 ตัวพร้อมกันจากด้านซ้ายและด้านขวาทำมุม 45 องศา กับแกนนอนดังแสดงในภาพที่ 38



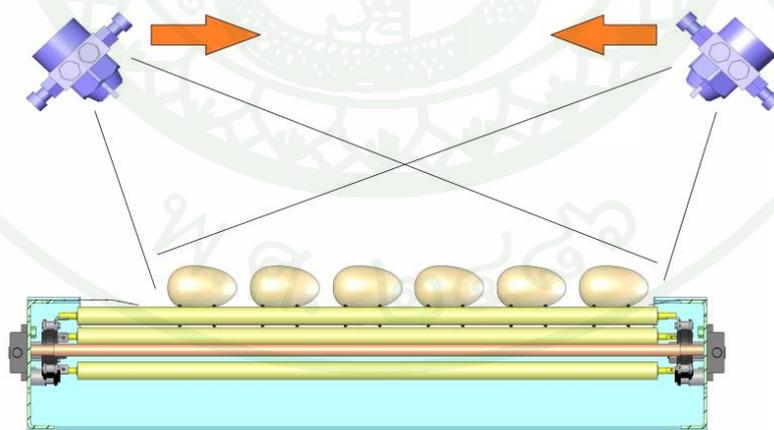
ภาพที่ 38 การทดสอบการฟันสีโดยหัวสปรีย์จำนวน 2 ตัวพร้อมกันจากด้านซ้ายและด้านขวา

จากผลการทดสอบพบว่า สีที่ไข่มีความไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 39 และไข่ที่อยู่บริเวณริมสายพานลำเลียงสีจะติดไข่เพียงด้านที่อยู่ใกล้หัวสเปรย์เท่านั้น เนื่องจากเมื่อพ่นสีจากหัวสเปรย์ทางด้านซ้ายและขวาพร้อมกัน ลมที่ออกจากหัวสเปรย์ทั้งสองด้านสวนทางกันทำให้เกิดแรงต้านและความปั่นป่วน

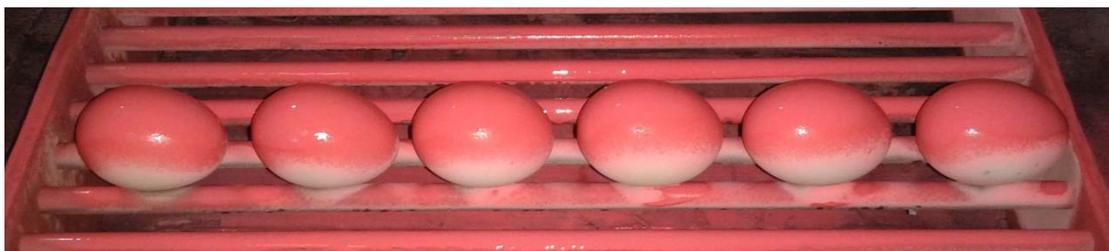


ภาพที่ 39 ผลการทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์จำนวน 2 ตัวพร้อมกันจากด้านซ้ายและด้านขวา

ดังนั้นจึงทำการออกแบบการพ่นสีใหม่โดยใช้หัวสเปรย์เพียงตัวเดียว พ่นสีที่มุม 45 องศา กับแกนนอน เคลื่อนที่จากทางซ้ายไปขวา โดยหันหัวสเปรย์เข้าหาไข่ จากนั้นเคลื่อนที่กลับจากทางขวามาซ้าย โดยหันหัวสเปรย์ในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 40 จากการทดสอบพบว่าสีที่เกาะเปลือกไข่มีความสม่ำเสมอ และสามารถพ่นสีได้ครบทั้งสองด้านของเปลือกไข่ดังแสดงในภาพที่ 41



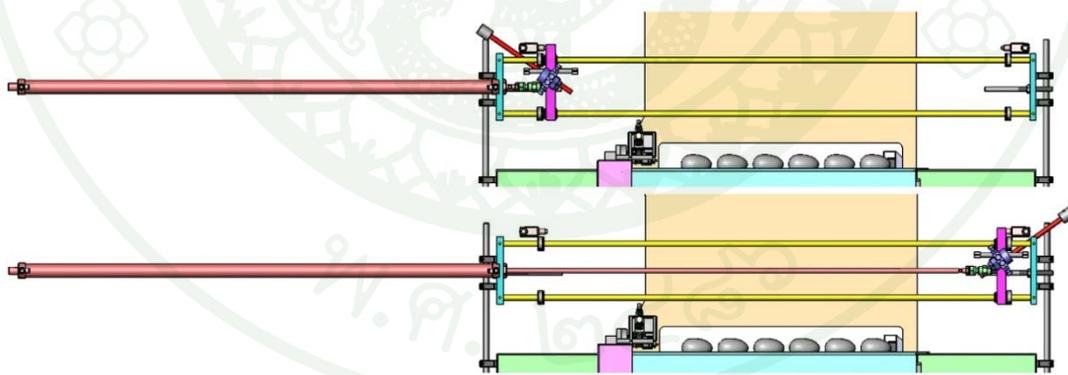
ภาพที่ 40 การทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์ตัวเดียวเคลื่อนที่ไปและกลับจากด้านซ้ายไปขวา



ภาพที่ 41 ผลการทดสอบการพ่นสีโดยหัวสเปรย์ตัวเดียวเคลื่อนที่ไปและกลับจากด้านซ้ายไปขวา

การออกแบบชุดพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

จากผลการทดสอบพ่นสีไข่เยี่ยวม้าข้างต้น ชุดพ่นสีไข่เยี่ยวม้าถูกออกแบบให้พ่นสีไข่ทั้งสองด้าน โดยทำมุม 45 องศา กับแกนนอน เริ่มแรกหัวสเปรย์จะเคลื่อนที่จากทางด้านซ้ายของสายพานลำเลียง โดยหัวสเปรย์ทำมุม 45 องศา และหันไปทางขวา เพื่อที่จะพ่นสีไข่ด้านซ้าย เมื่อหัวสเปรย์เคลื่อนที่ไปสุดทางด้านขวา หัวสเปรย์จะหันกลับมาทางด้านซ้ายทำมุม 45 องศา เพื่อที่จะพ่นสีไข่ด้านขวา จากนั้นหัวสเปรย์จะเคลื่อนที่กลับมาทางด้านซ้ายของสายพานลำเลียงอีกครั้งและหันกลับไปทางด้านขวา เพื่อที่จะรอพ่นสีไข่แถวต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 42 โดยหัวสเปรย์แสดงด้วยสีน้ำเงิน



ภาพที่ 42 การทำงานของชุดพ่นสีในเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า

การเลือกใช้กระบอบกลมในชุดพ่นสี

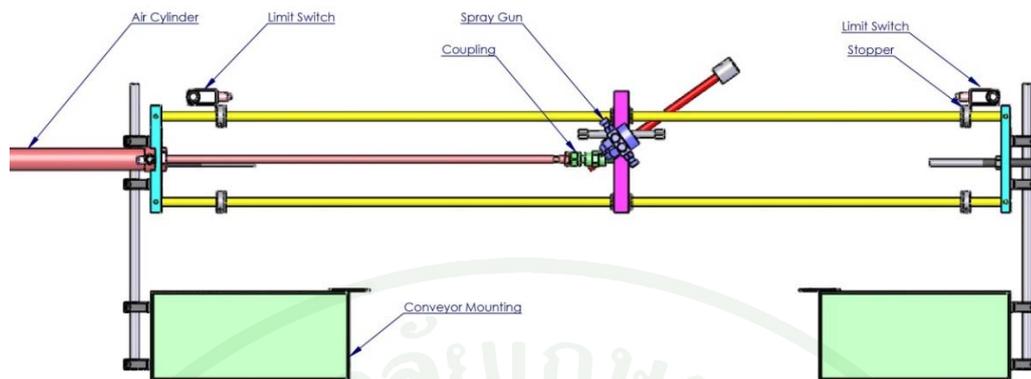
ชุดพ่นสีเคลื่อนที่โดยใช้กระบอบกลมซึ่งควบคุมการจ่ายลมด้วยโซลินอยด์วาล์ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของหัวสเปรย์มีแรงเสียดทานต่ำมาก จึงเลือกใช้กระบอบกลมที่มีขนาดเล็ก และเพื่อที่จะให้อัตราการผลิตมาก จึงจำเป็นต้องให้แต่ละแถวของสายพานลำเลียงสามารถวางไขได้มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกกระบอบกลมที่มีความยาว ซึ่งกระบอบขนาดเล็กที่สามารถหาได้มีความยาวสูงสุด 1,000 mm โดยเลือกใช้กระบอบกลมแบบ Double Acting ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ก้านกระบอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 0.9 MPa ช่วงความเร็ว 30 – 800 mm/s และสามารถส่งกำลังไปทางด้านหน้าได้สูงสุด 441.0 N และด้านหลัง 370.8 N ซึ่งเกินกว่าภาระโหลดที่ต้องการมาก คุณสมบัติของกระบอบกลมที่เลือกสามารถดูได้จากภาคผนวกที่ ข4

การทำงานของกระบอบกลมในชุดพ่นสี

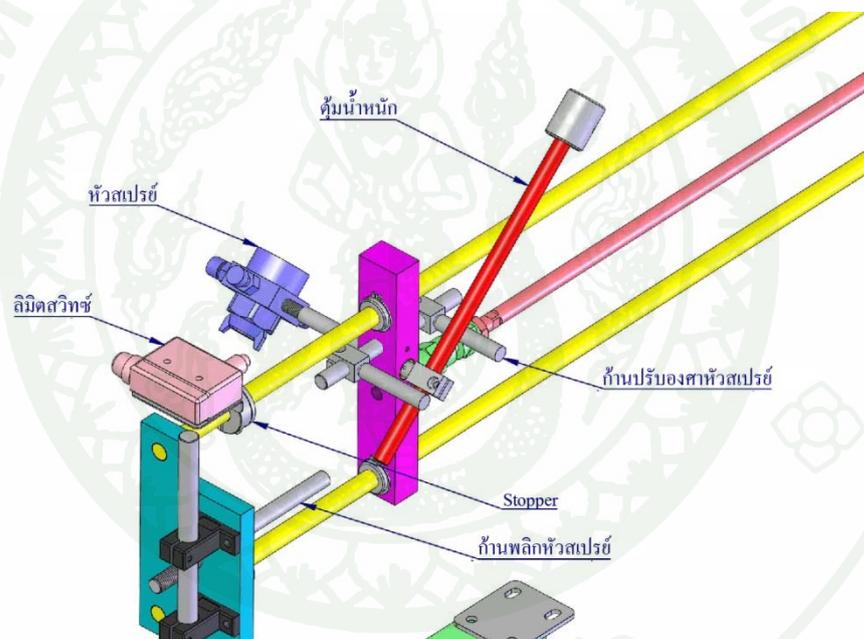
เมื่อกระบอบกลมและหัวสเปรย์เคลื่อนจากด้านซ้ายไปจนกระทั่งชน Stopper ทางด้านขวาดังแสดงในภาพที่ 43 ลิimitsวิตซ์ที่ติดอยู่กับ Stopper จะส่งสัญญาณไปสั่งงานโซลินอยด์วาล์วให้จ่ายลมไปยังกระบอบกลมในทิศทางตรงกันข้าม เพื่อให้หัวสเปรย์เคลื่อนที่กลับมายังด้านซ้ายอีกครั้ง โดยโซลินอยด์วาล์วที่เลือกใช้เป็นแบบ 5/3 คือ มีช่องลมจำนวน 5 ช่องและมี 3 ตำแหน่งการจ่ายลม ดังแสดงในภาคผนวกที่ ข1 ที่กระบอบกลมจะมีอุปกรณ์ควบคุมลม (Speed Control Valve) เพื่อปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดหัวสเปรย์ และลมที่เข้าสู่ระบบจะผ่าน Filter regulator เพื่อกรองอากาศเข้าและปรับความดันของลม

กลไกในการพลิกด้านหัวสเปรย์

จากภาพที่ 44 แสดงกลไกในการพลิกด้านหัวสเปรย์ เมื่อหัวสเปรย์เคลื่อนที่มาจนกระทั่งสุดปลายด้านหนึ่ง ด้านล่างของตุ้มน้ำหนักจะชนกับก้านพลิกหัวสเปรย์ทำให้ตุ้มน้ำหนักและหัวสเปรย์พลิกกลับไปอีกด้านหนึ่ง โดยตุ้มน้ำหนักจะพิงกับก้านปรับองศาหัวสเปรย์อีกข้างหนึ่ง จากนั้นชุดหัวสเปรย์จะชนกับ Stopper และลิimitsวิตซ์ แล้วเคลื่อนที่กลับไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ก้านปรับองศาหัวสเปรย์จะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งหัวสเปรย์ทำมุม 45 องศาทั้งสองข้าง โดยการเลื่อนระยะให้ตุ้มน้ำหนักพิงกับก้านที่ 45 องศา



ภาพที่ 43 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดพ่นสีในเครื่องพ่นสีไข่ม้วน

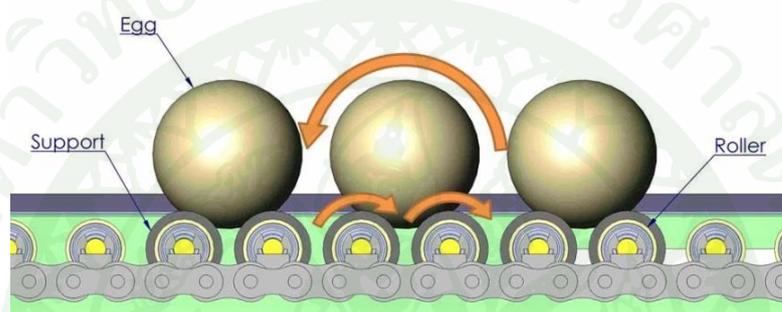


ภาพที่ 44 กลไกการพลิกด้านหัวสเปรย์

2.3.2 ผลการออกแบบชุดพลิกไข่

การออกแบบการพลิกไข่

เนื่องจากบนสายพานลำเลียงไข่จะถูกวางอยู่บน Roller ดังแสดงในภาพที่ 45 การพลิกไข่จะใช้วิธีการหมุน Roller ทั้งสองลูกที่ไข่วางอยู่ไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้ไข่ที่วางอยู่บน Roller หมุนด้านที่ยังไม่ได้ฟักขึ้นมา

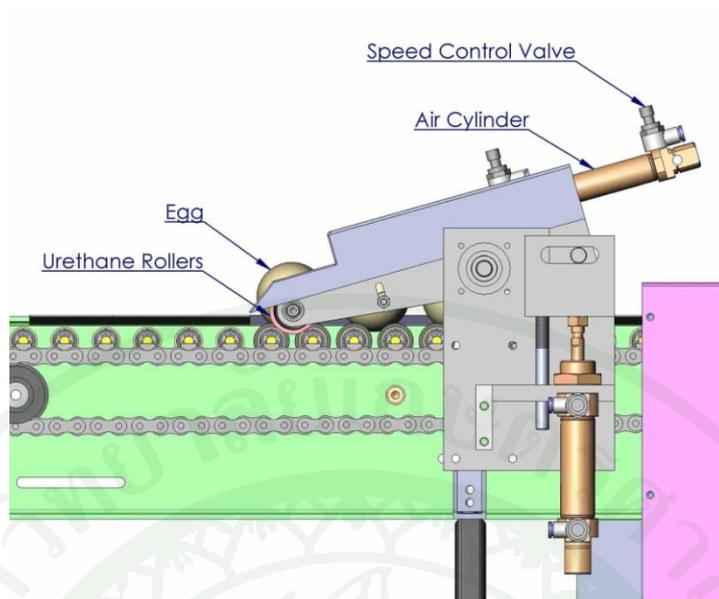


ภาพที่ 45 การหมุนไข่เพื่อที่จะฟักด้านต่อไป

การทำงานของชุดพลิกไข่

ชุดพลิกไข่ถูกออกแบบให้มีลูกยาง (Urethane Rollers) เพื่อที่จะกดลงระหว่าง Roller ทั้งสองลูก และหมุน Roller เพื่อพลิกไข่ด้านที่ยังไม่ได้ฟักขึ้นมาด้านบน จากนั้นจะยกลูกยางขึ้นแล้วหมุนลูกยางกลับเข้าที่เดิม

โดยชุดพลิกไข่ที่ออกแบบประกอบไปด้วยกระบอกลมจำนวน 2 กระบอก กระบอกลมอันแรกใช้ในการกดลูกยางลงบน Roller กระบอกที่สองใช้ในการหมุนลูกยาง ซึ่งกระบอกลมแต่ละกระบอกจะมีอุปกรณ์ควบคุมลม (Speed Control Valve) เพื่อปรับความเร็วในการกดและการหมุนของลูกยาง ดังแสดงในภาพที่ 46 โดยลมที่จ่ายไปยังกระบอกลมจะผ่าน Filter regulator เพื่อกรองอากาศเข้าและปรับน้ำหนักการกดและการหมุนของลูกยาง กระบอกลมจะถูกควบคุมการจ่ายลมด้วยโซลินอยด์วาล์ว โดยโซลินอยด์วาล์วที่เลือกใช้เป็นแบบ Single 5/2 way



ภาพที่ 46 ชุดพลิกไข่

การเลือกใช้กระบอกลมของชุดพลิกไข่

ในชุดพลิกไข่ประกอบด้วยกระบอกลม 2 กระบอกคือ กระบอกลมสำหรับกดลูกยางลงบน Roller และกระบอกลมสำหรับหมุนลูกยาง

ในการออกแบบกระบอกลมสำหรับกดลูกยาง กระบอกลมสำหรับกดลูกยาง ต้องออกแรงเพียงพอที่จะไม่ให้เกิดการ Slip ระหว่างลูกยางกับ Roller เมื่อลูกยางถูกหมุน โดยการ Slip จะเกิดขึ้นเมื่อ แรงต้านจากการหมุนของไข่และแรงต้านจากการหมุนของ Roller มีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง Roller และลูกยาง

แรงต้านจากการหมุนของไข่และแรงต้านจากการหมุนของ Roller ประกอบไปด้วย แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่ แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller และแรงต้านจากความเสียดทานของตลับลูกปืนใน Roller

- การคำนวณแรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่, F_1

$$\text{จาก} \quad T = I\alpha \quad (41)$$

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (42)$$

โดยที่ T = แรงบิด
 I = โมเมนต์ความเฉื่อย
 α = ความเร่งเชิงมุม
 ω_2 = ความเร็วเชิงมุมสุดท้าย
 ω_1 = ความเร็วเชิงมุมเริ่มต้น
 t = เวลา

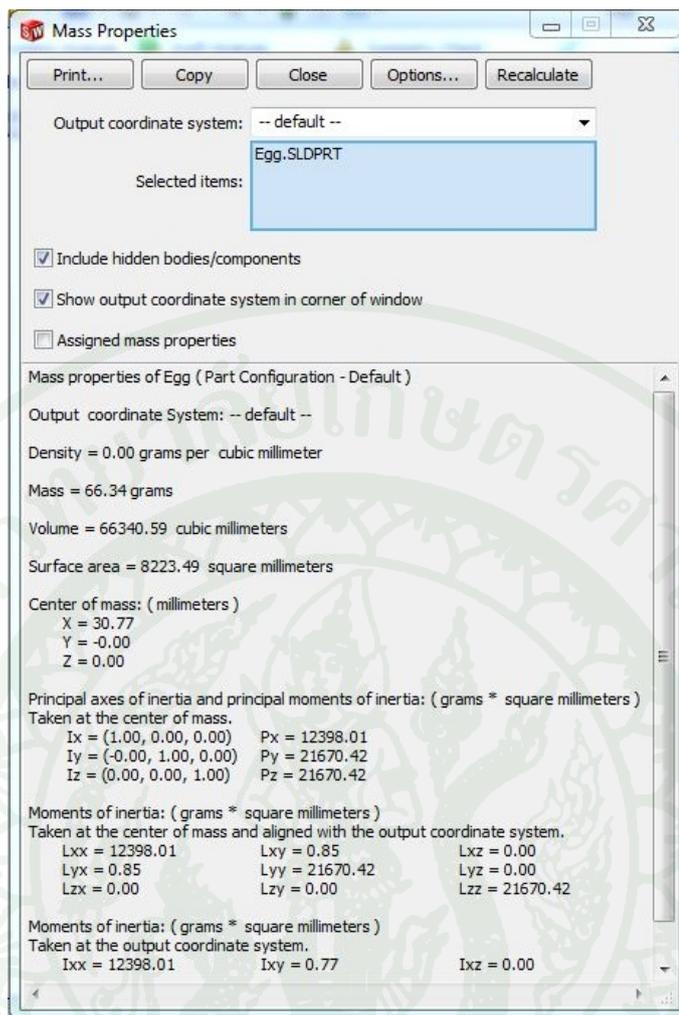
ชุดพลิกไข่จะพลิกไข่เป็นมุม 90 องศา คิดเป็นมุม θ เท่ากับ $0.5\pi \text{ rad}$ โดยกำหนดให้ระยะเวลาในการพลิกไข่เป็น 1 วินาที ดังนั้นความเร็วเริ่มต้น ω_1 มีค่าเท่ากับ 0 และความเร็วสุดท้ายหาได้จาก

$$\omega_2 = \frac{\theta}{t} \quad (43)$$

$$\omega_2 = 0.5\pi \text{ rad/s}$$

ดังนั้นความเร่งเชิงมุม, $\alpha = 0.5\pi \text{ rad/s}^2$

ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่ เนื่องจากในความเป็นจริงไข่มีหลายขนาดและหลายรูปร่าง ดังนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของไข่ในโปรแกรม SolidWorks โดยใช้ขนาดไข่ที่ได้จากการสำรวจขนาดของไข่เยี่ยวม้าจากผู้ประกอบการดังที่กล่าวมาข้างต้น และนำมาหาโมเมนต์ความเฉื่อยโดยโปรแกรม SolidWorks ดังแสดงในภาพที่ 47 โดยโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่ที่ได้มีค่าเท่ากับ 12398.01 g/mm^2 หรือ $1.24 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$



ภาพที่ 47 การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่ด้วยโปรแกรม SolidWorks

$$\text{ดังนั้นแรงบิด, } T = 0.5\pi \times 1.24 \times 10^{-5} = 1.95 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$$

เนื่องจากใน 1 แกวมีจำนวนไข่ทั้งหมด 6 ฟอง ดังนั้นแรงบิดจากโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่มีค่าเท่ากับ $6 \times 1.95 \times 10^{-4} = 1.17 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$ ไข่มีรัศมี 23.35 mm หรือ 0.02335 m แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่คำนวณจาก

$$T = F \times r \quad (44)$$

$$F_l = 1.17 \times 10^{-4} \div 0.02335$$

$$F_l = 5.01 \times 10^{-3} \text{ N}$$

แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของไข่มีค่า 0.00501 N

- การคำนวณแรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller, F_2

ความเร็วเชิงมุมสุดท้ายของ Roller สามารถหาได้จาก

$$\omega_2 = \frac{\theta}{t} \quad (45)$$

$$\theta = \frac{s}{r}$$

โดยที่ θ = มุมในหน่วย rad
 s = ระยะกระจัดในแนวรัศมี
 r = รัศมี

หาระยะกระจัดในแนวรัศมีของ Roller ได้โดย $S_{\text{roller}} = S_{\text{roller}}$

$$S_{\text{roller}} = \theta_{\text{roller}} \times r_{\text{roller}}$$

$$S_{\text{roller}} = 0.5\pi \times 46.7 \div 2$$

$$S_{\text{roller}} = 36.38 \text{ mm}$$

ดังนั้น $S_{\text{roller}} = 36.38 \text{ mm}$ นำไปแทนเพื่อหาค่า θ

$$\theta_{\text{roller}} = S_{\text{roller}} \div r_{\text{roller}}$$

$$\theta_{\text{roller}} = 36.38 \div 8.55$$

$$\theta_{\text{roller}} = 4.25 \text{ rad}$$

ดังนั้นความเร็วเชิงมุมสุดท้ายของ Roller มีค่าเท่ากับ 4.25 rad/s ความเร่งเชิงมุมสุดท้ายของ Roller มีค่าเท่ากับ 4.25 rad/s^2 และจากการสร้างแบบจำลองสามมิติและหาโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller ด้วยโปรแกรม SolidWorks โมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller ที่ได้มีค่าเท่ากับ 26523.59 g/mm^2 หรือ $2.65 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$

$$\text{นำไปหาแรงบิด ได้แรงบิด, } T = 2.65 \times 10^{-5} \times 4.25 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$$

เนื่องจากกลุยกางหมุน Roller จำนวน 2 ตัว ดังนั้นแรงบิดจากโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller มีค่า

เท่ากับ $2 \times 1.13 \times 10^{-4} = 2.26 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$ Roller มีรัศมี 8.55 mm หรือ 0.00855 m แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller คำนวณจาก

$$T = F \times r \quad (46)$$

$$F_2 = 2.26 \times 10^{-4} \div 0.00855$$

$$F_2 = 0.0264 \text{ N}$$

แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของ Roller มีค่า 0.0264 N

- การคำนวณแรงต้านจากความเสียดทานของตลับลูกปืนใน Roller, F_3

$$\text{จาก} \quad F = \mu \times N \quad (47)$$

โดยที่ F = แรงต้านจากความเสียดทานของตลับลูกปืน

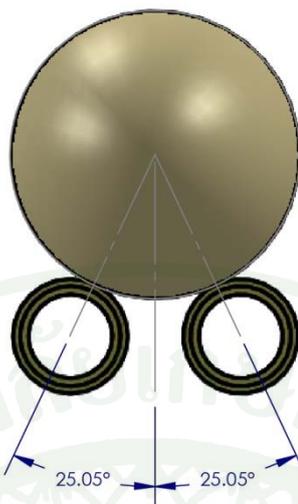
μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตลับลูกปืน

N = แรงที่กระทำกับตลับลูกปืน

แรงที่กระทำกับตลับลูกปืนประกอบไปด้วยแรงจากน้ำหนักของไขและแรงจากการกดของลูกยาง ในส่วนของแรงจากน้ำหนักของไขสามารถคำนวณได้ โดยคิดจากน้ำหนักของไขจำนวน 6 ฟองซึ่งมีค่าเท่ากับ 398.04 g หรือ 0.398 kg กดลงบน Roller 2 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 48 โดยที่ Roller แต่ละตัวมีตลับลูกปืนสองข้าง ดังนั้นแรงจากน้ำหนักของไขที่กระทำกับตลับลูกปืนแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$4 \times N_{\text{ฟอง}} \times \cos 25.05 = 0.398 \times 9.81$$

$$N_{\text{ฟอง}} = 1.08 \text{ N}$$

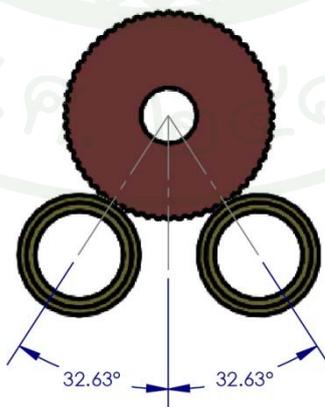


ภาพที่ 48 ทิศทางของแรงจากน้ำหนักของไข้ที่กระทำกับตลับลูกปืนของ Roller

ในส่วนของแรงจากการกดของลูกยาง เนื่องจากยังไม่ทราบค่าแรงกดของลูกยาง จึงลองกำหนดค่าแรงกดของลูกยางให้เท่ากับ 10 N โดยที่ลูกยางมีขนาด 30 mm ออกแรงกระทำกับตลับลูกปืนในทิศทางดังแสดงในภาพที่ 49 ดังนั้นแรงจากการกดของลูกยางที่กระทำกับตลับลูกปืนแต่ละตัวสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$4 \times N_{\text{ลูกยาง}} \times \cos 32.63 = 10$$

$$N_{\text{ลูกยาง}} = 2.97\text{ N}$$



ภาพที่ 49 ทิศทางของแรงจากการกดของลูกยางที่กระทำกับตลับลูกปืนของ Roller

ดังนั้นผลรวมของแรงที่กระทำกับลูกปืนมีค่าเท่ากับ 4.05 N และจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดรัมลูกปืนที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 0.02 เนื่องจากดรัมลูกปืนที่ Roller มีทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้นแรงต้านจากดรัมลูกปืนของ Roller ทั้งหมดคำนวณจาก

$$F_3 = 4 \times 0.02 \times 4.05$$

$$F_3 = 0.32 \text{ N}$$

ดังนั้นผลรวมของแรงต้านจากการหมุนของโซ่กับแรงต้านจากการหมุนของ Roller มีค่าเท่ากับ

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

$$F = 0.00501 + 0.0264 + 0.32$$

$$F = 0.36 \text{ N}$$

ในส่วนของการคำนวณแรงเสียดทานระหว่างลูกยางกับ Roller จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลูกยางกับ Roller มีค่าประมาณ 0.38 และกำหนดให้แรงกดของลูกยางให้เท่ากับ 10 N ดังนั้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างลูกยางกับ Roller สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$f = \mu \times 2 \times N_{\text{ลูกยาง}}$$

$$f = 0.38 \times 2 \times 2.97$$

$$f = 2.26 \text{ N}$$

จากการคำนวณ แรงเสียดทานระหว่างลูกยางกับ Roller มีค่ามากกว่าผลรวมของแรงต้านจากการหมุนของโซ่กับแรงต้านจากการหมุนของ Roller ดังนั้น จึงไม่เกิดการ Slip ขึ้นระหว่างลูกยางกับ Roller โดยแรงต้านส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น จะเกิดจากแรงกดของลูกยางซึ่งกระทำกับดรัมลูกปืนใน Roller ซึ่งแรงกดของลูกยางที่เลือกมีความเพียงพอ โดยเมื่อในกรณีที่แรงเสียดทานของลูกยางลดลงเมื่อผ่านการใช้งานไปแล้ว และแรงเสียดทานที่เกิดจากชิ้นส่วนอื่น ๆ

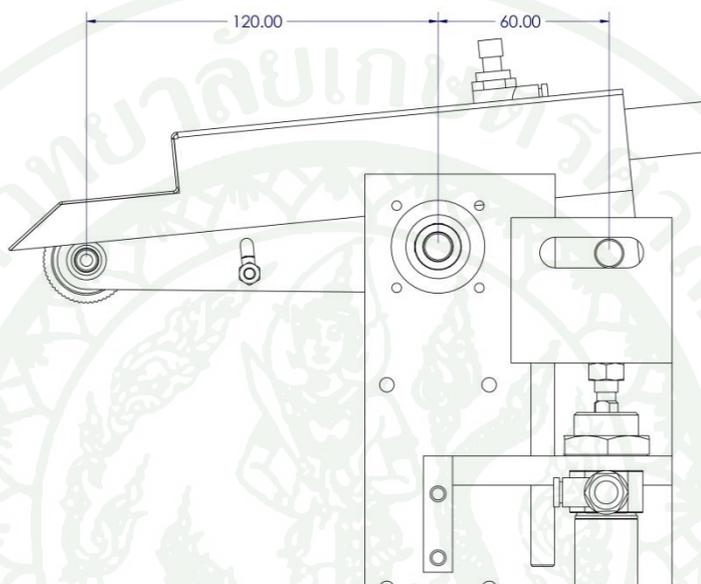
จากแรงกดลูกยางที่กำหนด นำไปคำนวณแรงที่กระบอกลมสำหรับกดลูกยางจากระยะห่างระหว่างลูกยางกับจุดหมุนมีเท่ากับ 120 mm และระยะห่างระหว่างกระบอกลมกับจุดหมุนเท่ากับ 60 mm ดังแสดงในภาพที่ 50 แรงของกระบอกลมสำหรับกดลูกยางคำนวณดังนี้

$$F_{\text{กระบอกลม}} \times 60 = F_{\text{ลูกยาง}} \times 120$$

$$F_{\text{กระบอกลม}} = F_{\text{ลูกยาง}} \times 120 \div 60$$

$$F_{\text{กระบอกลม}} = 10 \times 120 \div 60$$

$$F_{\text{กระบอกลม}} = 20 \text{ N}$$



ภาพที่ 50 แสดงระยะห่างระหว่างลูกยาง กระบอกลมสำหรับกดลูกยาง และจุดหมุน

จากการคำนวณเลือกกระบอกลมสำหรับกดลูกยาง แบบ Double Acting ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ก้านกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 0.7 MPa ช่วงความเร็ว 50 – 750 mm/s และที่ความดันลมจ่าย 0.1 MPa สามารถส่งกำลังไปทางด้านหน้าได้ 31.4 N และด้านหลัง 26.4 N คุณสมบัติของกระบอกลมที่เลือกสามารถดูได้จากภาคผนวกที่ ข3

ในส่วนของกระบอกลมสำหรับหมุนลูกยาง กระบอกลมต้องมีแรงเพียงพอที่จะเอาชนะแรงต้านต่าง ๆ ดังนี้ แรงต้านจากการหมุนของไข้ แรงต้านจากการหมุนของ Roller และแรงต้านการหมุนของลูกยาง โดยแรงต้านจากการหมุนของไข้และแรงต้านจากการหมุนของ Roller สามารถดูได้จากการคำนวณในข้างต้น ในส่วนของแรงต้านการหมุนของลูกยางแสดงการคำนวณได้ดังนี้

แรงต้านการหมุนของลูกยางประกอบไปด้วย แรงต้านจากโมเมนต์ความเฉื่อยของชุดลูกยาง และแรงต้านจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นในตลับลูกปืนของชุดลูกยาง

- การคำนวณ โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดลูกยาง

จาก $T = I\alpha$ (48)

$$\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} \quad (49)$$

โดยที่ T = แรงบิด
 I = โมเมนต์ความเฉื่อย
 α = ความเร่งเชิงมุม
 ω_2 = ความเร็วเชิงมุมสุดท้าย
 ω_1 = ความเร็วเชิงมุมเริ่มต้น
 t = เวลา

ความเร็วเริ่มต้น ω_1 มีค่าเท่ากับ 0 และความเร็วสุดท้ายหาได้จาก

$$\omega_2 = \frac{\theta}{t} \quad (50)$$

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (51)$$

โดยที่ θ = มุมในหน่วย rad
 s = ระยะกระจัดในแนวรัศมี
 r = รัศมี

หาระยะกระจัดในแนวรัศมีของ Roller ได้โดย $s_{roller} = s_{ลูกยาง}$ จากการคำนวณเบื้องต้น s_{roller} มีค่าเท่ากับ 36.38 mm ดังนั้น $s_{ลูกยาง} = 36.38 \text{ mm}$ ลูกยางมีรัศมี 15 mm นำไปแทนเพื่อหาค่า θ

$$\theta_{ลูกยาง} = s_{roller} \div r_{ลูกยาง}$$

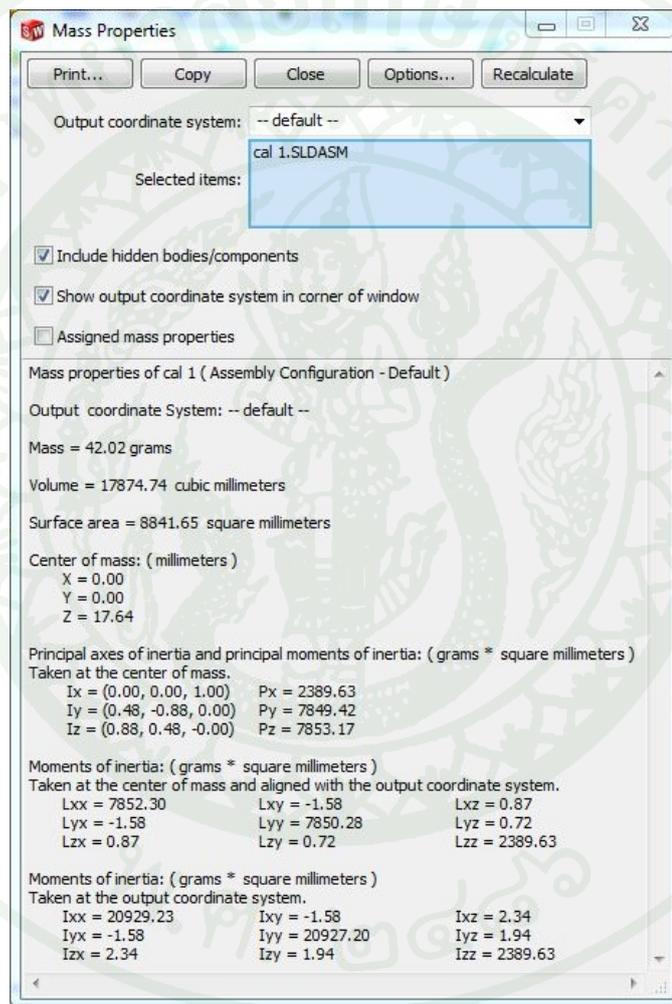
$$\theta_{ลูกยาง} = 36.38 \div 15$$

$$\theta_{ลูกยาง} = 2.43 \text{ rad}$$

ได้ความเร็วสุดท้าย, $\omega_2 = 2.43 \text{ rad/s}$

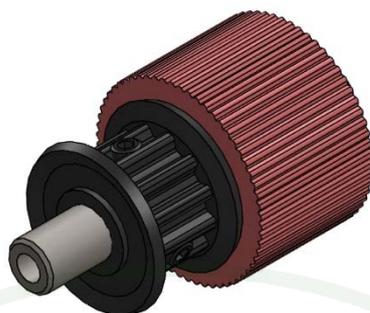
และความเร่งเชิงมุม, $\alpha = 2.43 \text{ rad/s}^2$

จากการสร้างแบบจำลองสามมิติและหาโมเมนต์ความเฉื่อยชุดลูกยาง ด้วยโปรแกรม SolidWorks โมเมนต์ความเฉื่อยชุดลูกยาง ที่ได้มีค่าเท่ากับ 20929.23 g/mm^2 หรือ $2.09 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2$ ดังแสดงในภาพที่ 51 และ 52



ภาพที่ 51 การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของชุดลูกยางด้วยโปรแกรม SolidWorks

ดังนั้นแรงบิด, $T = 2.43 \times 2.09 \times 10^{-5} = 5.08 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}$



ภาพที่ 52 แบบจำลองสามมิติของชุดลูกยางด้วยโปรแกรม SolidWorks

- การคำนวณแรงบิดจากความเสียดทานของตลับลูกปืนของชุดลูกยาง

จาก $T = \mu \times N \times r$ (52)

โดยที่ T = แรงบิดจากความเสียดทานของตลับลูกปืน
 μ = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตลับลูกปืน
 N = แรงที่กระทำกับตลับลูกปืน
 r = รัศมีของตลับลูกปืน

ตลับลูกปืนที่เลือกใช้มีรัศมี 4.7 mm หรือ 0.0047 m มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.015 และจากที่กำหนดแรงกดที่ลูกยางเท่ากับ 10 N นำมาคำนวณแรงบิดจากความเสียดทานของตลับลูกปืนได้

$$T = 0.015 \times 10 \times 0.0047$$

$$T = 7.05 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$$

- การคำนวณแรงบิดจากแรงต้านจากการหมุนของไข้กับแรงต้านจากการหมุนของ Roller

จากผลรวมของแรงต้านจากการหมุนของไข้กับแรงต้านจากการหมุนของ Roller ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นเท่ากับ 0.36 N และรัศมีของลูกยางเท่ากับ 15 mm หรือ 0.015 m นำมาคำนวณแรงบิดได้จาก

$$T = F \times r \quad (53)$$

โดยที่ T = แรงบิด
 F = ผลรวมของแรงต้านจากการหมุนของไข้กับแรงต้านจากการหมุนของRoller
 r = รัศมีของลูกยาง

ดังนั้น $T = 0.36 \times 0.015$
 $T = 5.4 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}$

ดังนั้นผลรวมของโมเมนต์ที่ลูกยาง, $T_{\text{รวม}}$ มีค่าเท่ากับ

$$T_{\text{รวม}} = 5.08 \times 10^{-5} + 7.05 \times 10^{-4} + 5.4 \times 10^{-3}$$

$$T_{\text{รวม}} = 6.16 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}$$

เนื่องจากกระบอกลมสำหรับหมุนลูกยางจะถูกต่อเข้ากับสายพาน โดยสายพานจะส่งกำลังไปขับเคลื่อนลูกล้อสายพานซึ่งอยู่แกนเดียวกับลูกยาง ลูกล้อสายพานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 19.10 mm ดังนั้นแรงของกระบอกลมจะคำนวณจาก

$$T = F \times r \quad (54)$$

โดยที่ T = ผลรวมของแรงบิด
 F = แรงของกระบอกลม
 r = รัศมี pitch ของลูกล้อสายพาน

ดังนั้น $F = (6.16 \times 10^{-3}) \div (9.55 \times 10^{-3})$
 $F = 6.45 \times 10^{-4} \text{ N}$

จากการคำนวณจะเห็นว่ากระบอกลมสำหรับหมุนลูกยางต้องการแรงที่น้อยมาก แต่เนื่องจากราคาของกระบอกลมขนาดเล็กจะมีราคาสูง จึงเลือกใช้กระบอกลมขนาดใหญ่แทนซึ่งสามารถที่จะส่งแรงได้มากกว่าที่ต้องการ

ในส่วนของความยาวของกระบอกกลมสำหรับหมุนลูกยางจะคำนวณจาก

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (55)$$

โดยที่ θ = มุมในหน่วย *rad*
 s = ความยาวของกระบอกกลม
 r = รัศมี pitch ของลูกล้อยาสายพาน

โดยไขจะถูกลมหมุน 90 องศาคิดเป็น $0.5\pi \text{ rad}$ ลูกล้อยาสายพานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 19.10 mm จะได้

$$s = 0.5\pi \times 9.55$$

$$s = 15.00 \text{ mm}$$

ดังนั้นกระบอกกลมที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm ก้านกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm สามารถรับแรงดันได้สูงสุด 0.7 MPa ช่วงความเร็ว $50 - 750 \text{ mm/s}$ และที่ความดันลมจ่าย 0.1 Mpa สามารถส่งกำลังไปทางด้านหน้าได้ 20.1 N และด้านหลัง 17.3 N โดยเลือกกระบอกกลมความยาว 30 mm เพื่อที่จะเพื่อในกรณีที่ไขมีขนาดใหญ่ คุณสมบัติของกระบอกกลมที่เลือกสามารถดูได้จากภาคผนวกที่ 3

2.3.3 ผลการออกแบบชุดเป่าแห้งสี

การทดสอบการเป่าแห้งสี

เพื่อที่จะหาระยะเวลาในการเป่าแห้งสี ซึ่งระยะเวลาในการเป่าแห้งสีนี้จะส่งผลต่อความยาวของสายพานลำเลียง เนื่องจากหลังจากพ่นสีแล้วไขจะเคลื่อนที่ผ่านชุดเป่าแห้งสี โดยระยะเวลาที่ไขเคลื่อนที่ผ่านชุดเป่าแห้งสีนี้จะต้องนานเพียงพอที่จะทำให้ไขแห้งสนิท เพื่อที่จะพลิกและพ่นสีในด้านต่อไป ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบการเป่าแห้งสีด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้คือ ปล่องยให้แห้งตามปกติ ใช้ลมเป่า และใช้ลมร้อนเป่า โดยในการทดสอบจะใช้ Thermometer เพื่อวัดอุณหภูมิของลมที่ใช้ในการเป่าแห้งสี ใช้ปล่องลมดังแสดงในภาพที่ 17 ในการรวมกระแสลมจากพัดลม และใช้ Pitot tube ในการวัดความเร็วลม ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการเป่าแห้งสี

| วิธีการ | อุณหภูมิ (°C) | ความเร็วลม (m/s) | ระยะเวลา (นาที) |
|---------------------|---------------|------------------|-----------------|
| ปล่อยให้แห้งตามปกติ | 31 | - | 11.35 |
| เป่าลม | 31 | 6.7 | 2.27 |
| เป่าลมร้อน | 40 | 6.3 | 1.41 |

เพื่อที่จะให้สายพานลำเลียงมีความยาวนานที่สุด ซึ่งจะสามารถลดขนาดตัวเครื่องและลดงบประมาณในการสร้างเครื่อง วิธีการเป่าแห้งสีที่ใช้เวลาน้อยที่สุดจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบชุดเป่าแห้งสีในเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวมา จากตารางผลการทดสอบการเป่าแห้งสีข้างต้นจะพบว่า การเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C สามารถทำให้สีแห้งได้เร็วที่สุด ดังนั้นจึงทำการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสี เพื่อที่จะนำไปออกแบบฮีตเตอร์ในชุดเป่าแห้งสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวมา

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสี

ในการออกแบบสายพานลำเลียง พื้นที่ที่ต้องการเป่าแห้งสีมีความกว้างประมาณ 0.5 m และจากเกณฑ์การออกแบบ เพื่อให้ได้อัตราการผลิตตามที่ต้องการ 3,750 ฟองต่อชั่วโมง หรือตกอยู่ที่ประมาณ 1 ฟองต่อวินาที ในแต่ละแถวสามารถวางไข่ได้จำนวน 6 ฟอง ดังนั้นระยะเวลาทำงานในแต่ละแถวต้องไม่มากกว่า 6 วินาที จากตารางที่ 4 การเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C สามารถทำให้สีแห้งได้ในเวลา 1.41 นาทีหรือคิดเป็น 101 วินาที คิดเป็นจำนวนไข่ประมาณ 17 แถว โดยไข่แต่ละแถวมีระยะห่าง 50.8 mm ดังนั้นการเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C เพื่อเป่าแห้งสี ต้องใช้ระยะทาง 863 mm หรือประมาณ 0.86 m

เลือกพัดลมที่มีหน้ากว้าง 0.5 m เพื่อที่จะให้ลมกระจายเท่ากันทุกพื้นที่โดยไม่ต้องใช้ปล่องลมและ Damper ในการกระจายลม เลือกพัดลมขนาด 18 inch หรือคิดเป็น 0.46 m ดังนั้นเพื่อที่จะให้ครอบคลุมพื้นที่เป่าแห้งสีที่ต้องการจึงต้องใช้พัดลมจำนวน 2 ตัว

พัดลมที่เลือกใช้มีปริมาณการส่งลม $126 \text{ m}^3/\text{min}$ หรือคิดเป็นปริมาณ $4,450 \text{ cfm}$ พัดลมแต่ละตัวถูกออกแบบให้มีปล่องลมขนาด $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ หรือคิดเป็น 0.25 m^2 ดังนั้น สามารถนำไปคำนวณความเร็วลมได้เป็น 8.4 m/s

คำนวณพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสี โดยคิดจากอุณหภูมิออกแบบภายนอกที่ $24.8 \text{ }^\circ\text{C}$ คิดเป็น $76.64 \text{ }^\circ\text{F}$ จากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิต่ำสุดในฤดูฝนของภาคกลางจากกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งต้องทำความร้อนจนอากาศมีอุณหภูมิ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ คิดเป็น $104 \text{ }^\circ\text{F}$

$$\text{จาก } q_s = 1.1 \times cfm \times (t_2 - t_1) \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } q_s &= \text{พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ (btuh)} \\ cfm &= \text{ปริมาณลม (cfm)} \\ t_2 &= \text{อุณหภูมิอากาศที่ต้องการ (}^\circ\text{F)} \\ t_1 &= \text{อุณหภูมิอากาศที่เข้า (}^\circ\text{F)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } q_s &= 1.1 \times 4450 \times (104 - 76.64) \\ q_s &= 133,927.2 \text{ btuh} \\ q_s &= 39.25 \text{ kW} \end{aligned}$$

พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสีเท่ากับ 39.25 kW

$$\text{จาก } I = P \div V \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } I &= \text{กระแสไฟฟ้า (A)} \\ P &= \text{พลังงานไฟฟ้า (Watt)} \\ V &= \text{แรงดันไฟฟ้า (V)} \end{aligned}$$

ในกรณีที่ใช้ระบบไฟฟ้า 1 เฟสแรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับ 220 V ส่วนระบบไฟฟ้า 3 เฟสแรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับ 380 V

$$\begin{aligned} \text{กรณีที่ใช้ไฟฟ้า 1 เฟสจะได้ } I &= 39250 \div 220 \\ I &= 178.41 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กรณีที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟสจะได้} \quad I &= 39250 \div 380 \\ I &= 103.29 \text{ A} \end{aligned}$$

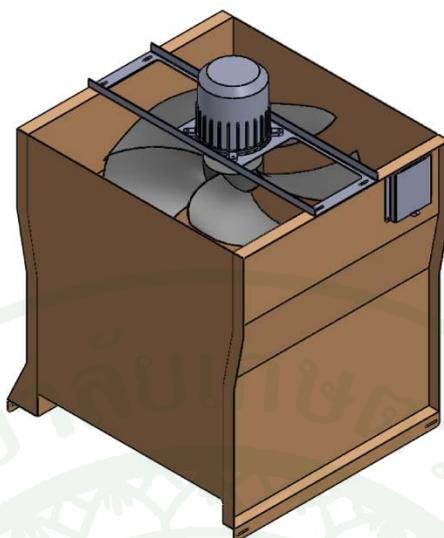
กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในฮีทเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสีต่อหนึ่งตัวในกรณีที่ใช้ไฟฟ้า 1 เฟสเท่ากับ 178.41 A จากการออกแบบต้องใช้ฮีทเตอร์จำนวนทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้นต้องใช้กระแสไฟฟ้าทั้งหมด 713.63 A ในกรณีที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟสกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดจะเท่ากับ 413.16 A

จากการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมที่ใช้เป่าแห้งสีแสดงให้เห็นว่าฮีทเตอร์จะใช้กำลังไฟฟ้าจำนวนมากทั้งระบบไฟฟ้า 1 เฟสและ 3 เฟส ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สูงมาก จึงเปลี่ยนไปใช้การเป่าลมที่สภาวะอากาศปกติแทน ซึ่งใช้ระยะเวลาเป่าแห้งไม่แตกต่างกันมากนัก

การเป่าแห้งสีด้วยลมที่สภาวะอากาศปกติใช้เวลา 147 วินาทีในการทำให้สีแห้งคิดเป็นจำนวนไขประมาณ 25 แฉว โดยไขแต่ละแฉวมีระยะห่าง 50.8 mm ดังนั้นการเป่าแห้งสีด้วยลมที่สภาวะอากาศปกติต้องใช้ระยะทาง 1,270 mm หรือประมาณ 1.27 m

เลือกใช้พัดลมขนาด 22 inch หรือคิดเป็น 0.56 m ดังนั้นเพื่อที่จะให้ครอบคลุมพื้นที่เป่าแห้งสีที่ต้องการจึงต้องใช้พัดลมจำนวน 2 ตัว ออกแบบให้มีปล่องลมขนาด 0.65 m × 0.65 m หรือคิดเป็น 0.4225 m² พัดลมมีปริมาณการส่งลม 184 m³/min หรือคิดเป็นประมาณ 6,500 cfm ดังนั้นสามารถนำไปคำนวณความเร็วลมได้เป็น 7.2 m/s

ทั้งนี้ระยะเวลาในการแห้งของสีบนเปลือกไขขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความหนาของสีที่พ่นลงบนเปลือกไข อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในขณะนั้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ไขที่เคลื่อนที่ผ่านชุดพ่นสีไขแห้งสนิท จึงออกแบบให้มีการหน่วงเวลาหลังจากที่ไขผ่านการพ่นสีแล้ว โดยเมื่อไขแฉวนั้น ๆ ผ่านการพ่นสีแล้วจะหน่วงเวลาก่อนที่ไขแฉวถัดไปจะเลื่อนเข้ามายังตำแหน่งพ่นสี ซึ่งสามารถที่จะปรับระยะเวลาได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่กล่าวมาในข้างต้น

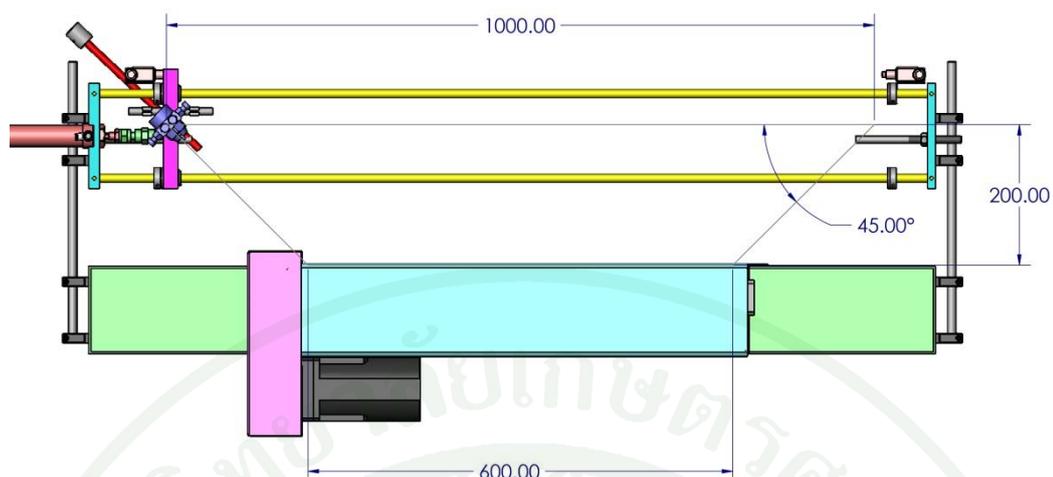


ภาพที่ 53 การสร้างแบบจำลองสามมิติของชุดเป่าแห้งสีด้วย โปรแกรม SolidWorks

2.3.4 ผลการออกแบบสายพานลำเลียง

การออกแบบสายพานลำเลียง

จากกระบอกลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวสเปรย์ที่มีความยาว 1,000 mm กำหนดให้ระยะห่างระหว่างหัวสเปรย์ถึงไข่เท่ากับ 200 mm ที่มุมของหัวสเปรย์ 45 องศา สายพานลำเลียงถูกออกแบบให้มีความกว้าง 656 mm ในหนึ่งแถวสามารถวางไข่ได้จำนวน 6 ฟอง ความยาวของสายพานคำนวณจากความยาวรวมทั้งหมดของ ชุดพ่นสี ชุดพลิกไข่ และชุดเป่าแห้งสี โดยชุดพลิกไข่และชุดพ่นสีมีความยาวรวมกัน 400 mm ชุดเป่าแห้งสีจำนวน 2 ชุดมีความยาวรวมกัน 1,300 mm ดังนั้น 1 สถานีจะมีความยาวรวม 1,700 mm เนื่องจากเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมมีสถานีพ่นสีจำนวน 2 สถานี และเพื่อระยะวางไข่อีก 300 mm รวมแล้วสายพานลำเลียงควรจะมีมีความยาว 3,700 mm ที่ปลายสายพานมีถาดรองรับไข่ที่ผ่านกระบวนการพ่นสีแล้ว



ภาพที่ 54 การออกแบบความกว้างของสายพานลำเลียง

สายพานลำเลียงที่ออกแบบใช้โซ่และเฟืองโซ่เป็นตัวส่งกำลัง โดยสายพานถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบมีเบรก โดยที่สายพานจะมีลิ้มิตสวิทช์ติดอยู่เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของสายพาน และนำไปสั่งการเปิดและปิดมอเตอร์ไฟฟ้า Roller ที่ใช้ในการวางโซ่จะยึดอยู่กับโซ่ทั้งสองข้าง โดยเลือกใช้โซ่แบบมีแป้นยึด

การเลือกขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้า

$$\text{คำนวณหาแรงดึงสูงสุดใน โซ่จาก} \quad T_{max} = T + T_1 \quad (58)$$

โดย T_{max} = แรงดึงสูงสุดในโซ่

T = แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพาน

T_1 = แรงในการเคลื่อนที่ของโซ่

คำนวณหาแรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพาน

$$\text{จาก} \quad T = M_1 \times g \times f_1 \times 1.1 + M_1 \times g \times f_2 + M_2 \times g \times f_3 \quad (59)$$

โดย M_1 = น้ำหนักของโซ่ร่วมกับ Roller

M_2 = น้ำหนักของโซ่บนสายพาน

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

f_1 = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพานจากลิ้มิต

- f_2 = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพานขาไป
 f_3 = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างที่โซ่เคลื่อนที่
 1.1 = ตัวคูณเนื่องจากความเสียดทานในการเปลี่ยนทิศทางของโซ่

จากการสร้างแบบจำลองสามมิติของโซ่และ Roller ด้วยโปรแกรม Solidworks โดยโซ่มีน้ำหนัก 0.67 kg/m สายพานมีโซ่จำนวนสองเส้นอยู่ที่สองด้านของสายพานโซ่มีความยาว 7.4 m ดังนั้นโซ่น้ำหนักโซ่ทั้งหมดเท่ากับ $7.4 \times 2 \times 0.67 = 9.91 \text{ kg}$ Roller แต่ละตัวมีน้ำหนัก 0.47 kg สายพานมี Roller ทั้งหมด 300 ตัว ดังนั้นน้ำหนักของ Roller ทั้งหมดจะเท่ากับ $300 \times 0.47 = 141 \text{ kg}$ น้ำหนักของโซ่และ Roller ทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 150.91 kg บนสายพานสามารถวางไข่ได้ทั้งหมด 450 ฟอง คิดน้ำหนักไข่เท่ากับ 70 g ดังนั้นน้ำหนักไขบนสายพานทั้งหมดจะเท่ากับ $31,500 \text{ g}$ หรือคิดเป็น 31.5 kg

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพานทั้งขาไปและขากลับมีค่าเท่ากัน สายพานและโซ่ทำจากโลหะและไม่มีการหล่อลื่น จากภาคผนวกที่ ข5 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพานเท่ากับ 0.35

แทนค่าในสมการได้

$$T = 75.46 \times 9.81 \times 0.35 \times 1.1 + 75.46 \times 9.81 \times 0.35 + 31.5 \times 9.81 \times 0.35$$

$$T = 652.23 \text{ N}$$

คำนวณหาแรงในการเคลื่อนที่ของโซ่

จาก $T = M \times (dv/dt)$ (60)

โดย M = น้ำหนักของโซ่รวมกับน้ำหนักวัตถุอื่น ๆ ที่ถูกลำเลียง

dv = ผลต่างของความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย

dt = ผลต่างของเวลาที่ความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย

กำหนดให้เวลาในการเคลื่อนที่แทนที่ของไขในแต่ละแถวเท่ากับ 1 วินาที ระยะห่างระหว่างไขแต่ละแถวเท่ากับ 50.8 mm ดังนั้นคิดเป็นความเร็ว 50.8 mm/s หรือ 0.0508 m/s โดยไขแต่ละแถวเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง กำหนดให้สายพานเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปยังความเร็ว 0.0508 m/s ในระยะเวลา 0.2 วินาที

แทนค่าในสมการได้

$$T = 150.91 \times (0.0508 \div 0.2)$$

$$T = 38.33 \text{ N}$$

แทนค่าเพื่อหาแรงดึงสูงสุดในโซ่ได้

$$T_{max} = 652.23 + 38.33$$

$$T_{max} = 690.56 \text{ N}$$

เลือกใช้เฟืองโซ่ของสายพานให้มีขนาดเล็กเพื่อลดขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฟืองโซ่ของสายพานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 41.1 mm ดังนั้นรัศมี pitch ของเฟืองโซ่มีค่าเท่ากับ 0.0205 m นำค่าแรงดึงสูงสุดในโซ่และรัศมี pitch ของเฟืองโซ่สายพานไปคำนวณหาแรงบิดได้จาก

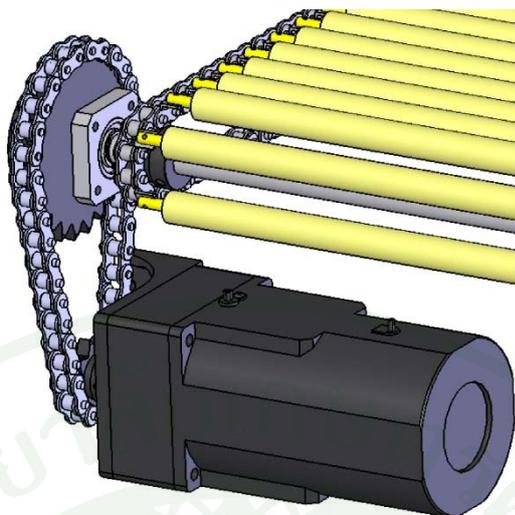
$$T = T_{max} \times r \quad (61)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } T &= \text{แรงบิด} \\ r &= \text{รัศมี pitch ของเฟืองโซ่} \end{aligned}$$

$$\text{แทนค่าได้ } T = 690.56 \times 0.0205$$

$$T = 14.16 \text{ N}\cdot\text{m}$$

จากเฟืองโซ่ของสายพานและเฟืองขับสายพานอยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยเฟืองโซ่ของสายพานมีจำนวนฟัน 10 ฟัน เฟืองขับสายพานมีจำนวนฟัน 24 ฟัน และเฟืองมอเตอร์มีจำนวนฟัน 9 ฟัน ดังแสดงในภาพที่ 55 โดยแรงบิดที่เฟืองสายพานจะเท่ากับแรงบิดที่เฟืองขับสายพาน



ภาพที่ 55 การขั้วสายพานโดยมอเตอร์ไฟฟ้า

คำนวณหาแรงบิดที่มอเตอร์ได้จาก

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (62)$$

โดย Z_1 = จำนวนฟันเฟืองมอเตอร์
 Z_2 = จำนวนฟันเฟืองขั้วสายพาน
 T_1 = แรงบิดที่เฟืองมอเตอร์
 T_2 = แรงบิดที่เฟืองขั้วสายพาน

แทนค่าได้ $T_1 = 9 \div 24 \times 14.16$

$$T_1 = 5.31 \text{ N}\cdot\text{m}$$

ดังนั้นแรงบิดที่มอเตอร์มีค่าเท่ากับ $5.31 \text{ N}\cdot\text{m}$ กำหนดให้มีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากมอเตอร์ 30% และสูญเสียกำลังงานเนื่องจากส่งกำลังอีก 20% จาก

$$T_{select} = \frac{T_1}{e_{motor} \times e_{loss}} \quad (63)$$

โดย T_{select} = แรงบิดของมอเตอร์ที่เลือกใช้
 e = ประสิทธิภาพในการถ่ายทอดกำลัง

แทนค่าได้ $T_{select} = 5.31 \div 0.7 \div 0.8$
 $T_{select} = 9.48 \text{ N}\cdot\text{m}$

คำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

จาก $V = \omega r$ (64)

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (65)$$

| | | | |
|-----|------------|---|----------------------------------|
| ให้ | V_1 | = | ความเร็วของสายพาน |
| | ω_1 | = | ความเร็วเชิงมุมของเฟืองโซ่สายพาน |
| | r_1 | = | รัศมี pitch ของเฟืองโซ่สายพาน |
| | V_2 | = | ความเร็วของโซ่ที่เฟืองขับสายพาน |
| | ω_2 | = | ความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับสายพาน |
| | r_2 | = | รัศมี pitch ของเฟืองขับสายพาน |
| | V_2 | = | ความเร็วของของโซ่ที่มอเตอร์ |
| | ω_2 | = | ความเร็วเชิงมุมของเฟืองมอเตอร์ |
| | r_2 | = | รัศมี pitch ของเฟืองมอเตอร์ |

หาความเร็วเชิงมุมของเฟืองโซ่สายพานจาก

$$\omega_1 = \frac{V_1}{r_1} \quad (66)$$

สายพานมีความเร็ว 50.8 mm/s หรือ 0.0508 m/s เฟืองโซ่ของสายพานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 41.1 mm คิดเป็นรัศมี pitch ของเฟืองโซ่มีค่าเท่ากับ 0.0205 m

แทนค่าได้ $\omega = 0.0508 \div 0.0205$
 $\omega = 2.47 \text{ rad/s}$

ความเร็วเชิงมุมของเฟืองโซ่สายพานจะเท่ากับความเร็วเชิงมุมของเฟืองขับสายพาน โดยเฟืองขับสายพานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 97.3 mm คิดเป็นรัศมี pitch ของเฟืองโซ่มีค่าเท่ากับ 0.0487 m นำไปหาความเร็วของโซ่ที่เฟืองขับสายพานได้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & V_2 = \omega_2 r_2 & (67) \\ \text{แทนค่าได้} \quad & V_2 = 2.47 \times 0.0487 \\ & V_2 = 0.12 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ความเร็วของโซ่ที่เฟืองขับสายพานจะเท่ากับความเร็วของโซ่ที่มอเตอร์ โดยเฟืองมอเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch เท่ากับ 37.13 mm คิดเป็นรัศมี pitch ของเฟืองโซ่มีค่าเท่ากับ 0.0186 m นำไปหาความเร็วเชิงมุมของเฟืองมอเตอร์ได้จาก

$$\begin{aligned} & \omega_3 = \frac{V_3}{r_3} & (68) \\ \text{แทนค่าได้} \quad & \omega = 0.12 \div 0.0186 \\ & \omega = 6.45 \text{ rad/s} \\ & \omega = 61.59 \text{ rpm} \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิด $9.48 \text{ N}\cdot\text{m}$ และมีความเร็วรอบ 61.59 rpm โดยมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์แบบมีเบรก เพื่อให้ โซ่แต่ละแถวหยุดตรงตำแหน่งที่ฟันสี่พอดี้ จากภาพผนวกที่ ข6 เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 90 W พร้อมเกียร์ทดที่มีอัตราทด 25 เท่า มีแรงบิดที่ปลายเพลลาเท่ากับ $10.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ มีความเร็วรอบ 60 rpm

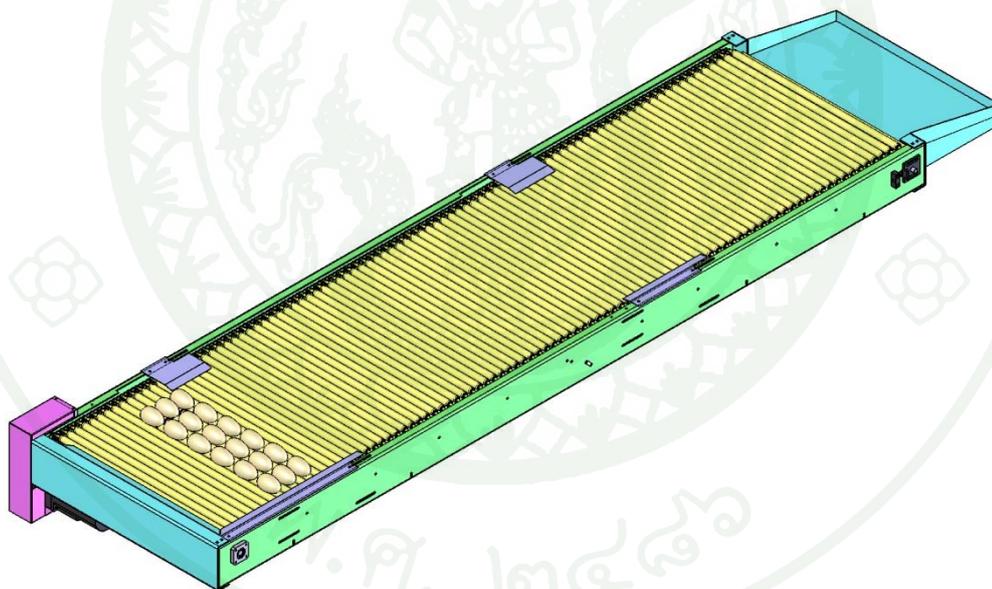
การเลือกใช้งานโซ่

การเลือกใช้งานโซ่จะเลือกจากขนาดของโซ่ จากที่กล่าวในข้างต้น โซ่จะถูกวางอยู่บน Roller 2 ตัวโดยระยะห่างระหว่าง Roller ที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้โซ่ที่อยู่ระหว่างแถวชนกันเท่ากับ 1 inch ทั้งสองข้างของ Roller จะยึดติดอยู่กับแป้นยึดที่ข้อโซ่ ดังนั้นจึงเลือกโซ่ที่ระยะ pitch เท่ากับ 12.7 mm และมีแป้นยึดทุก ๆ สองข้อ การคำนวณที่ผ่านมา สายพานมีแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 690.56 N ดังนั้นโซ่หนึ่งเส้นจะมีแรงดึง 345.28 N โดยโซ่ที่เลือกใช้สามารถรับแรงดึงสูงสุดได้ 2.75 kN หรือ $2,750 \text{ N}$ ซึ่งสามารถใช้งานได้

2.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากที่ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองสามมิติของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าดังแสดงในภาพที่ 56 แล้ว ได้ทำการหาคำนวณของชิ้นส่วนต่าง ๆ และน้ำหนักไข่ที่อยู่บนสายพาน ด้วยโปรแกรม SolidWorks ดังแสดงในภาพที่ 57 และนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาแรงกระทำต่อโครงสร้างและชิ้นส่วนหลักที่สำคัญของเครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 5 เพื่อใช้ในการดำเนินการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks

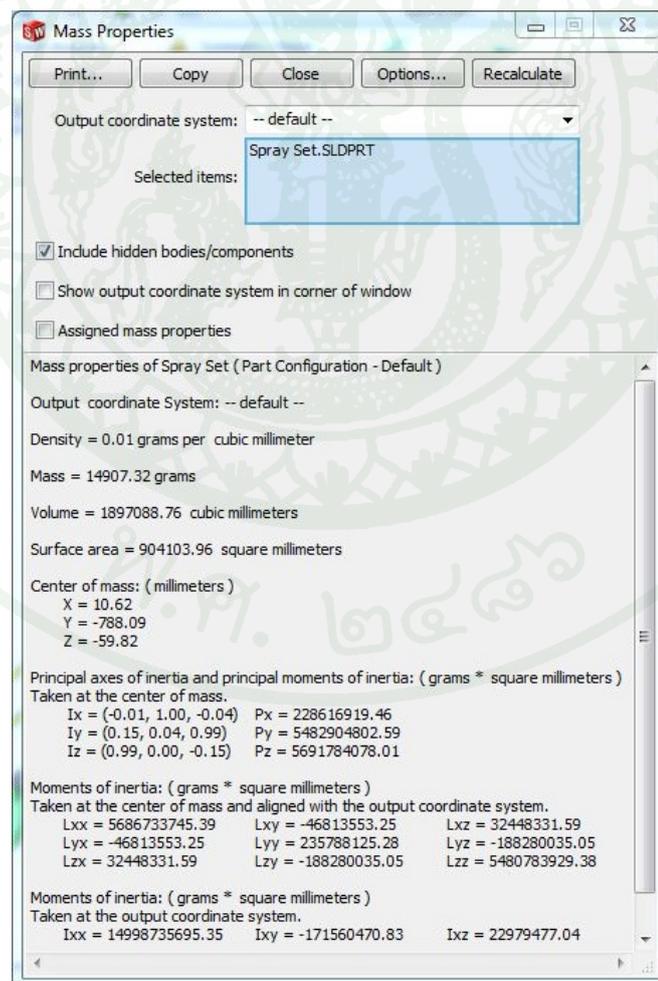
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สนใจคือ ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS), ความเค้น (Stress), และระยะเคลื่อนตัว (Displacement) โดยจะทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงในชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า คือ โครงสร้างหลักของสายพาน และฐานรองชุดสายพานลำเลียง



ภาพที่ 56 การสร้างแบบจำลองสามมิติของสายพานลำเลียงด้วยโปรแกรม SolidWorks

ตารางที่ 5 แรงจากน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยด้วยโปรแกรม SolidWorks

| ชิ้นส่วน | น้ำหนัก (kg) | แรง (N) |
|------------------------|--------------|---------|
| ชุดฟันสึ่ไข | 14.91 | 146.27 |
| ชุดเป่าแห้งสึ่ | 22.39 | 219.65 |
| ชุดพลิกไข | 3.92 | 38.46 |
| สายพาน | 94.12 | 923.32 |
| ไข | 18.90 | 185.41 |
| ชุดมอเตอร์ไฟฟ้า | 11.66 | 114.42 |
| โครงสร้างหลักของสายพาน | 33.44 | 328.05 |



ภาพที่ 57 การหาน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม SolidWorks

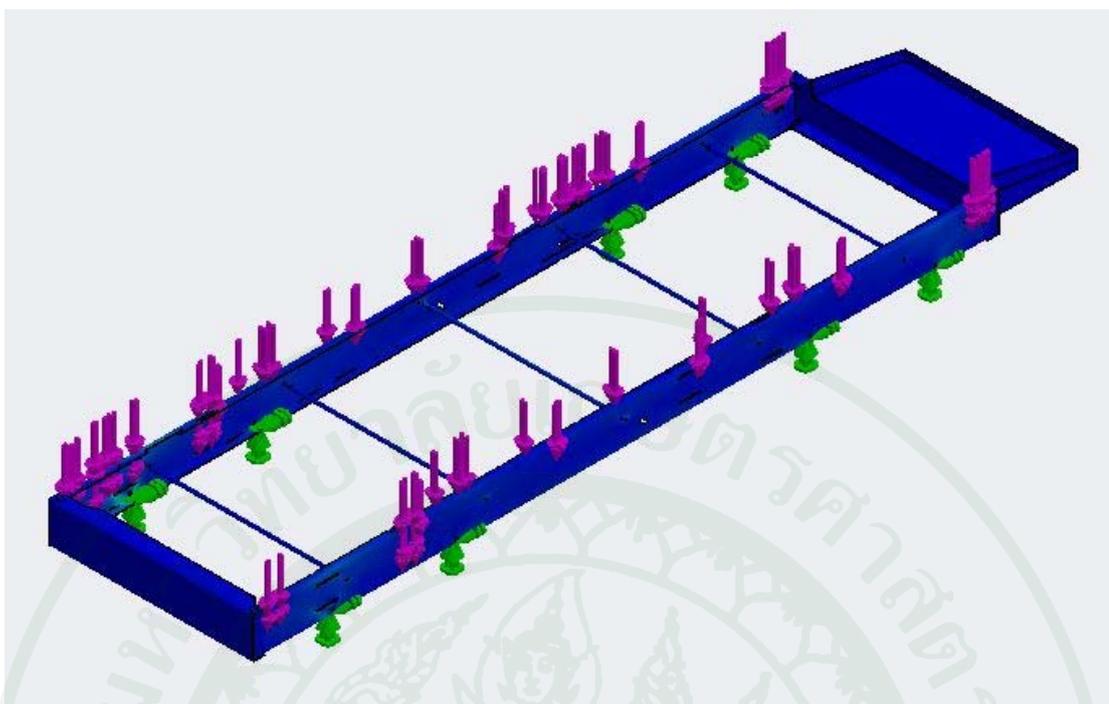
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดวัสดุที่ใช้ทำเครื่องพ่นสีไขเยียวมาตรฐานแบบ เป็น SS400 หรือ JIS G3101, ASTM A284 steel โดยวัสดุที่ใช้ทำตัวเครื่องมีคุณสมบัติดังตารางที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างเครื่อง

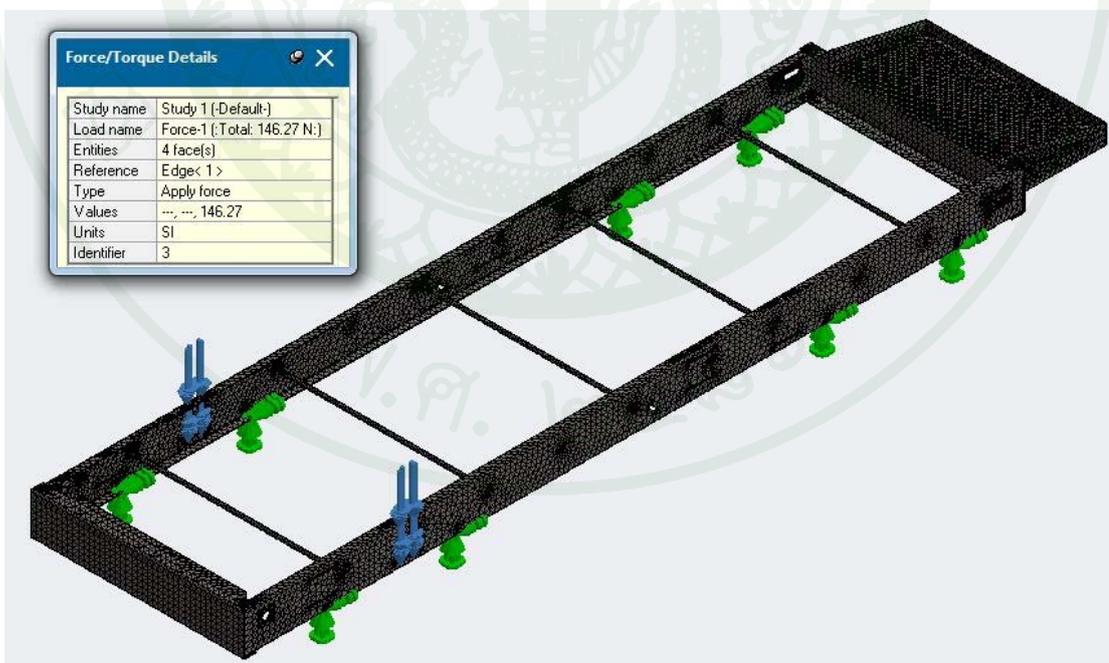
| คุณสมบัติของวัสดุ | ค่า | หน่วย |
|-------------------|--------------------|----------|
| Elastic modulus | 2×10^{11} | N/m^2 |
| Poisson's ratio | 0.26 | NA |
| Shear modulus | 8×10^{10} | N/m^2 |
| Mass density | 7850 | kg/m^3 |
| Tensile strength | 4.15×10^8 | N/m^2 |
| Yield strength | 2.3×10^8 | N/m^2 |

2.4.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักของสายพาน

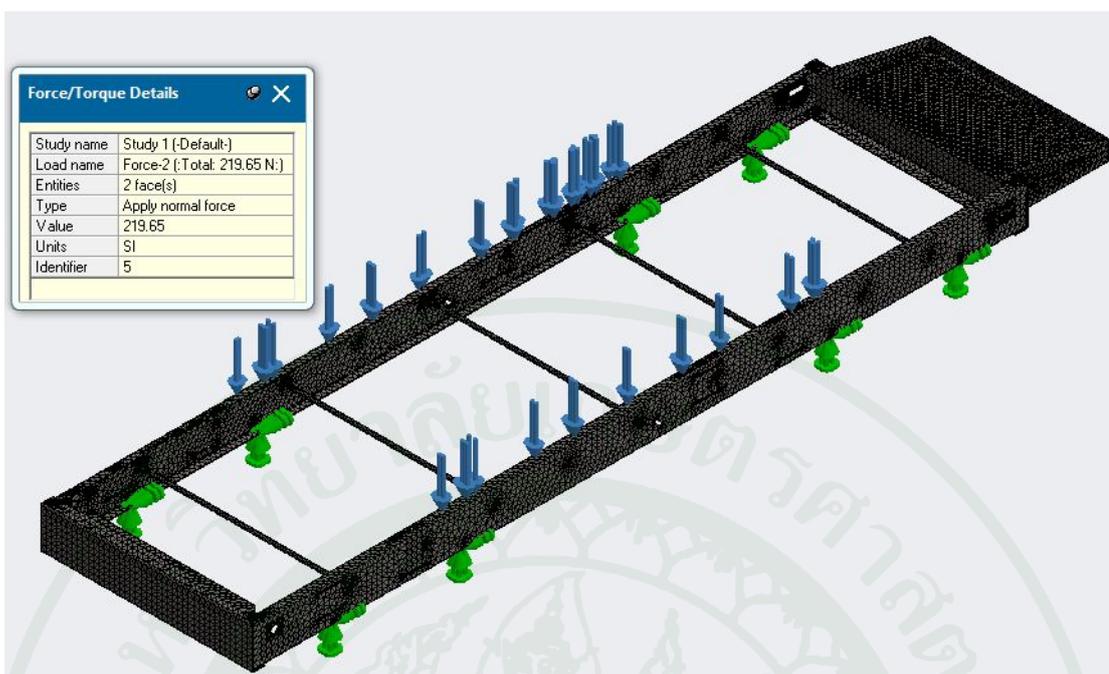
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักของสายพาน แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นแรงจากน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่อยู่บนสายพานลำเลียง รวมไปถึงน้ำหนักของไขด้วย โดยการหาน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ จะหาจากแบบจำลองสามมิติของชิ้นส่วนนั้นด้วยโปรแกรม SolidWorks น้ำหนักของชิ้นส่วนที่กระทำต่อโครงสร้างหลักของสายพาน ได้แก่ น้ำหนักของชุดเป่าแห้งสี น้ำหนักของชุดพลิกไข น้ำหนักของชุดพ่นสีไข น้ำหนักของสายพาน น้ำหนักของชุดมอเตอร์ไฟฟ้า โดยแรงที่กระทำต่าง ๆ จะอยู่ที่บริเวณจุดยึดของชิ้นส่วนนั้น ๆ กับโครงสร้างหลักของชุดสายพานลำเลียง และกำหนดจุดยึดของโครงสร้างหลักของชุดสายพานลำเลียงอยู่ที่บริเวณที่ยึดกับฐานรองชุดสายพานลำเลียง ดังแสดงในภาพที่ 58 ถึง 63



ภาพที่ 58 การกำหนดตำแหน่งแรงกระทำ (ลูกศรสีชมพู) และจุดยึด (ลูกศรสีเขียว) บนโครงสร้างหลัก



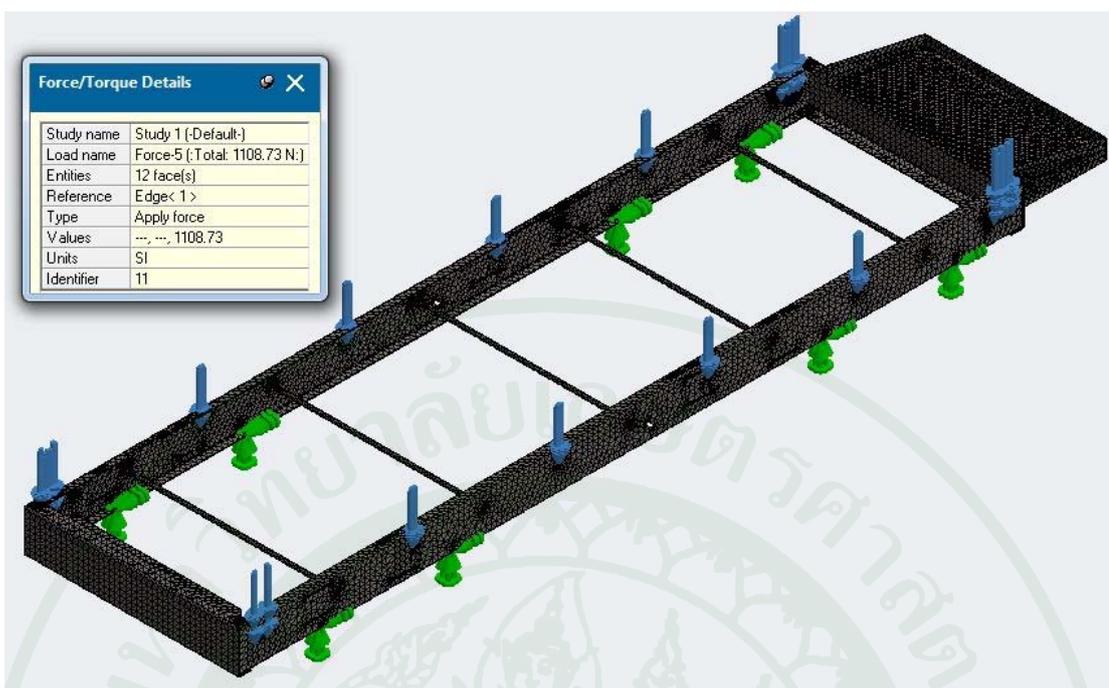
ภาพที่ 59 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดพ่นสีไข (ลูกศรสีฟ้า) บนโครงสร้างหลัก



ภาพที่ 60 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดเป่าแห้งสี (ลูกศรสีฟ้า) บนโครงสร้างหลัก



ภาพที่ 61 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดพลิกไข่ (ลูกศรสีฟ้า) บนโครงสร้างหลัก



ภาพที่ 62 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของสายพานและไข้ (ลูกศรสีฟ้า) บน โครงสร้างหลัก



ภาพที่ 63 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนักของชุดมอเตอร์ไฟฟ้า (ลูกศรสีฟ้า) บน โครงสร้างหลัก

ผลของการออกแบบเอลิเมนต์ที่โครงสร้างหลักของสายพาน

ปัญหาในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างหนึ่งคือการแบ่งเอลิเมนต์ เพราะว่าถ้าเกิดการแบ่งเอลิเมนต์นั้นถูกแบ่งหายากเกินไปผลที่ได้ก็จะไม่ตรงกับความเป็นจริงหรือถ้าหากมีการแบ่งเอลิเมนต์ที่ละเอียดเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการประเมินผลมาก โดยในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างหลักของสายพาน สามารถแบ่งเอลิเมนต์ย่อยได้ 55,454 เอลิเมนต์ และจำนวนโหนด 114,451 โหนด แสดงดังภาพที่ 64



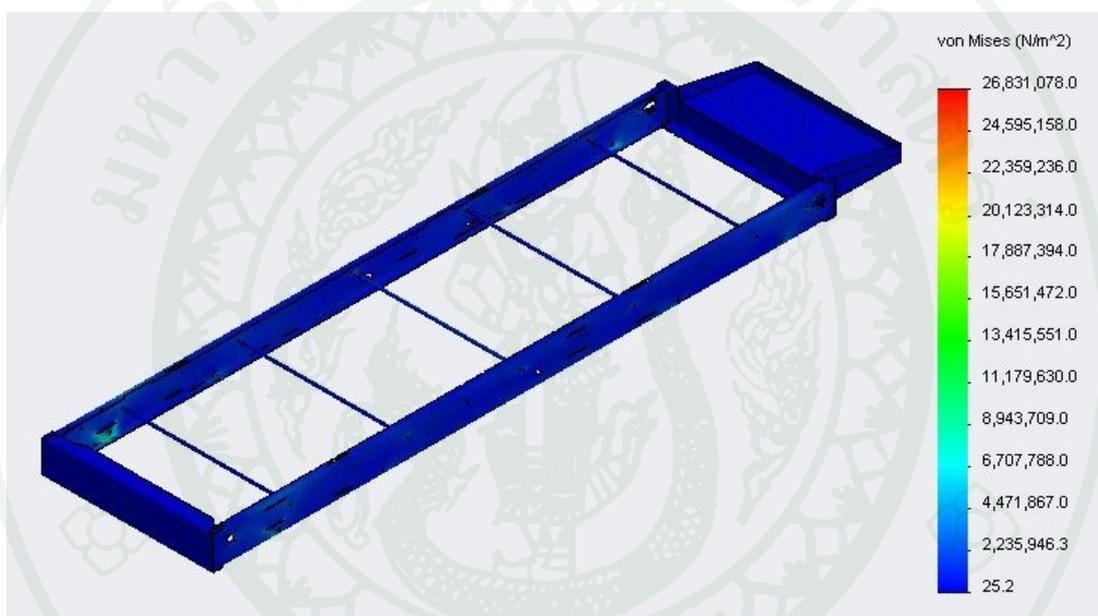
ภาพที่ 64 ผลของการแบ่งเอลิเมนต์ที่โครงสร้างหลักของสายพาน

ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นที่โครงสร้างหลักของสายพาน

ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นที่โครงสร้างหลักของสายพานได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 65 จุดที่มีค่าความเค้น Von Mises มากที่สุดคือบริเวณจุดยึดระหว่างโครงสร้างหลักของสายพานกับมอเตอร์และฐานรองชุดสายพานลำเลียง โดยมีค่าความเค้น Von Mises เท่ากับ $2.68 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของโครงสร้างหลักของสายพาน

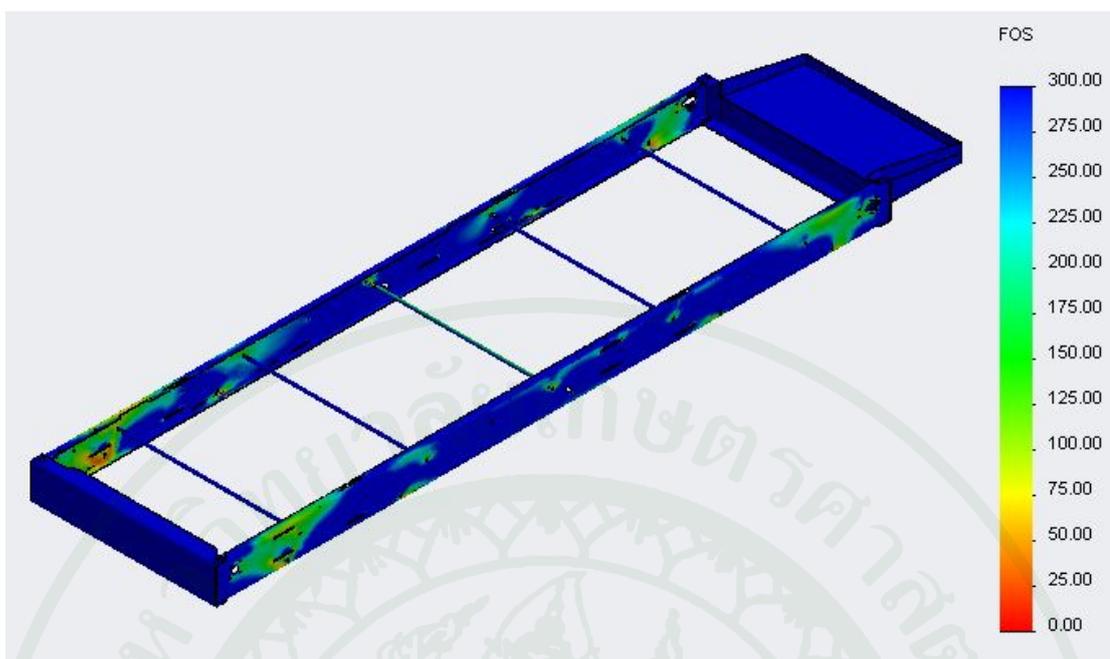
ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของโครงสร้างหลักของสายพานได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 66 โดยค่าความปลอดภัยของโครงสร้างหลักของสายพานมีค่าน้อยสุดอยู่ที่บริเวณจุดยึดระหว่างโครงสร้างหลักของสายพานกับมอเตอร์และฐานรองชุดสายพานลำเลียง ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเค้น Von Mises มากที่สุด โดยมีค่าความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 10.54 (ค่าความปลอดภัย, N สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านแรงคราก (Yield Strength), σ_y ของวัสดุนั้น ๆ ทหารด้วยความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในชิ้นงาน โดยค่าความปลอดภัยต้องมีค่ามากกว่า 1 เสมอ)



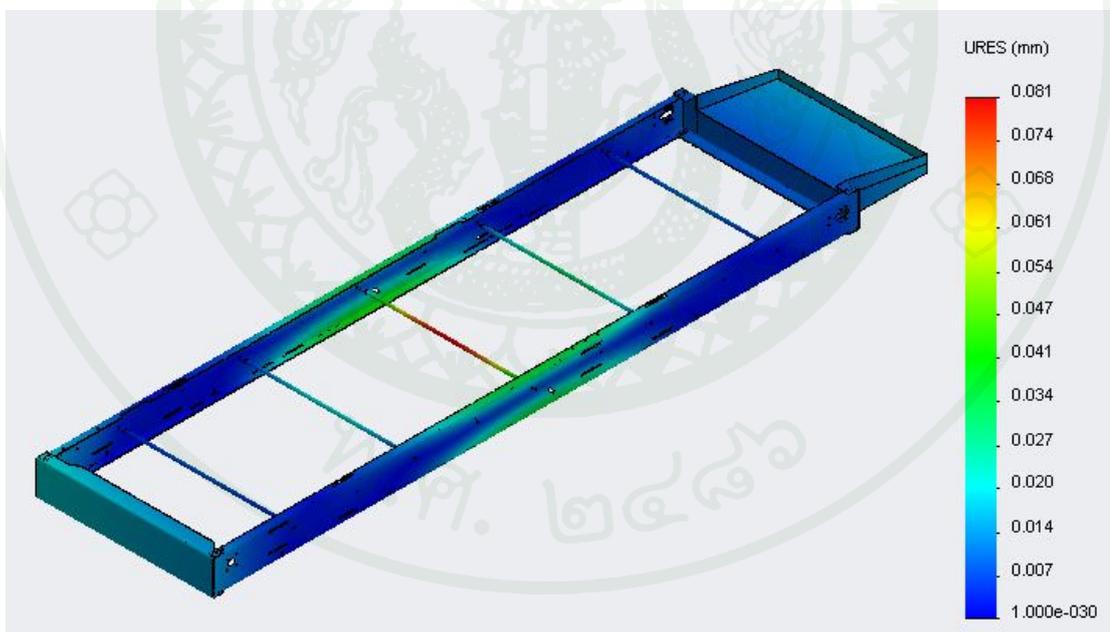
ภาพที่ 65 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นที่โครงสร้างหลักของสายพาน

ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัวของโครงสร้างหลักของสายพาน

ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของโครงสร้างหลักของสายพานได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 67 จากภาพจะเห็นว่าโครงสร้างหลักของสายพานจะมีระยะเคลื่อนตัวมากที่สุดบริเวณเพลากลางที่เชื่อมต่อสองข้างของโครงสร้างหลักของสายพาน โดยมีระยะเคลื่อนตัว 0.081 mm ถือได้ว่ามีค่าระยะเคลื่อนตัวที่น้อยมากซึ่งเป็นผลดีต่อการออกแบบโครงสร้างหลักของสายพาน



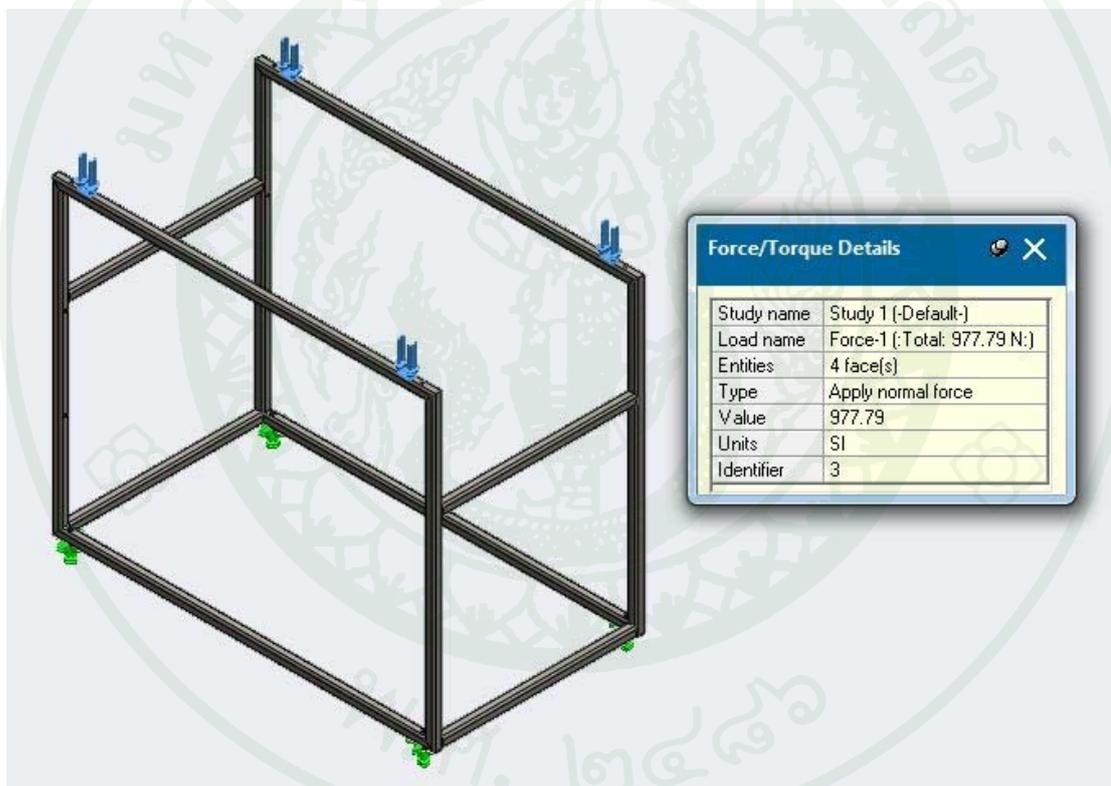
ภาพที่ 66 ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของโครงสร้างหลักของสายพาน



ภาพที่ 67 ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของโครงสร้างหลักของสายพาน

2.4.2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของฐานรองชุดสายพานลำเลียง

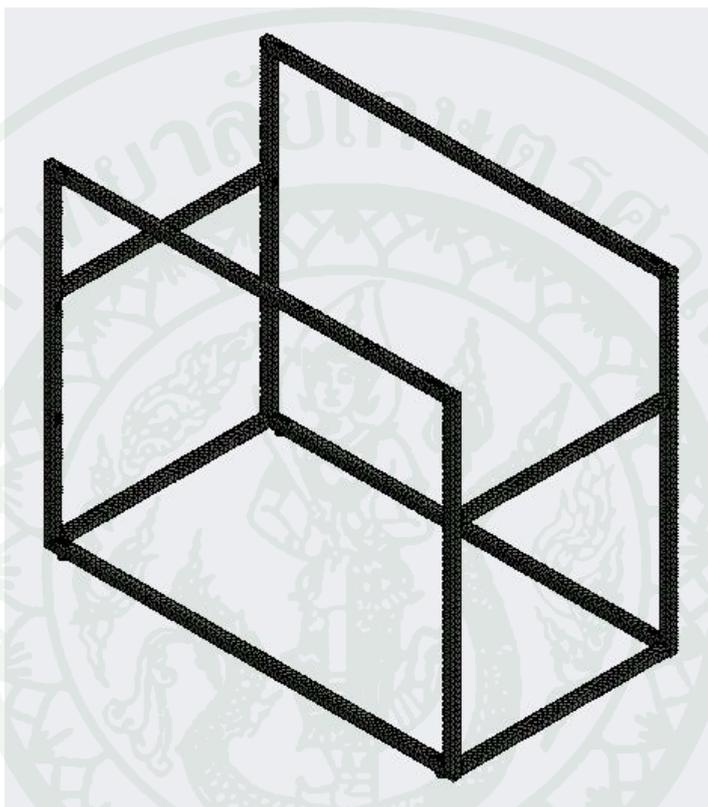
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของฐานรองชุดสายพานลำเลียง แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นแรงจากน้ำหนักของชิ้นส่วนทั้งหมดที่อยู่บนสายพานลำเลียง รวมไปถึงน้ำหนักของไขด้วย โดยการหาน้ำหนักของชิ้นส่วนต่าง ๆ จะหาจากแบบจำลองสามมิติของชิ้นส่วนนั้นด้วยโปรแกรม SolidWorks จากนั้นนำน้ำหนักไปคำนวณเป็นแรง โดยแรงที่กระทำกับฐานรองชุดสายพานลำเลียงจะอยู่ที่บริเวณจุดยึดของโครงสร้างหลักของชุดสายพานลำเลียงกับฐานรองชุดสายพานลำเลียง กำหนดจุดยึดของฐานรองชุดสายพานลำเลียงอยู่ที่บริเวณขาของฐานรองชุดสายพานลำเลียง ดังแสดงในภาพที่ 68



ภาพที่ 68 การกำหนดขนาดและตำแหน่งแรงกระทำจากน้ำหนัก (ลูกศรสีฟ้า) และจุดยึด (ลูกศรสีเขียว) บนโครงสร้างหลัก

ผลของการออกแบบเอลิเมนต์ของฐานรองชุดสายพานลำเลียง

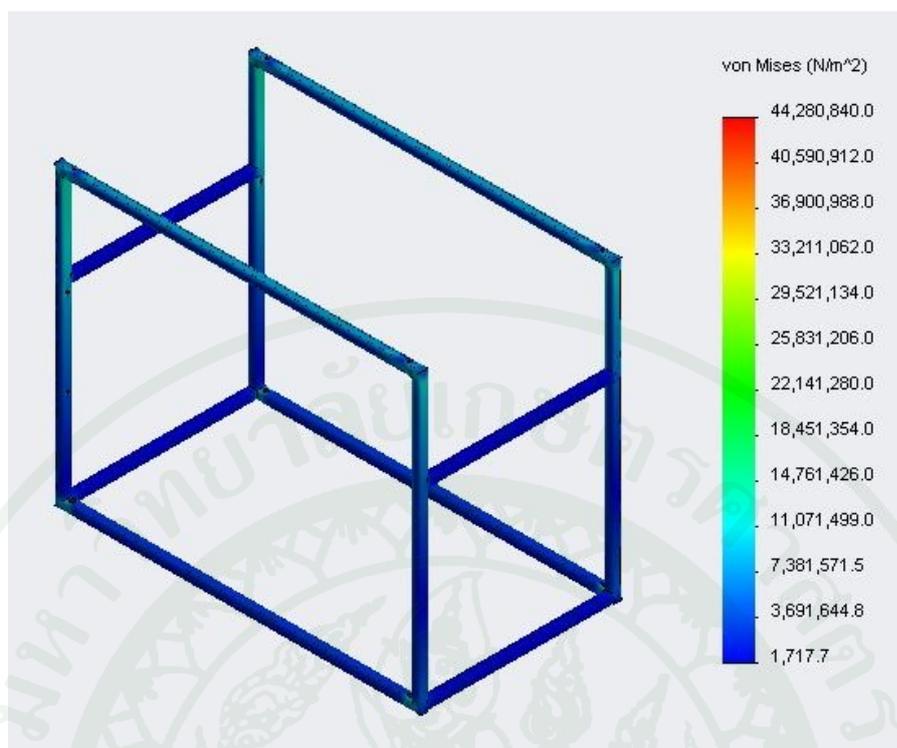
ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ฐานรองชุดสายพานลำเลียงสามารถแบ่งเอลิเมนต์ย่อยนั้นสามารถแบ่งได้ 85,719 เอลิเมนต์ และจำนวน โหนด 44,915 โหนด แสดงดังภาพที่ 69



ภาพที่ 69 ผลของการแบ่งเอลิเมนต์ที่ฐานรองชุดสายพานลำเลียง

ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นของฐานรองชุดสายพาน

ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นที่ฐานรองชุดสายพานลำเลียงได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 70 จุดที่มีค่าความเค้น Von Mises มากที่สุดคือบริเวณมุมในด้านบนของฐานรองชุดสายพานลำเลียง โดยมีค่า ความเค้น Von Mises เท่ากับ $4.43 \times 10^7 \text{ N/m}^2$



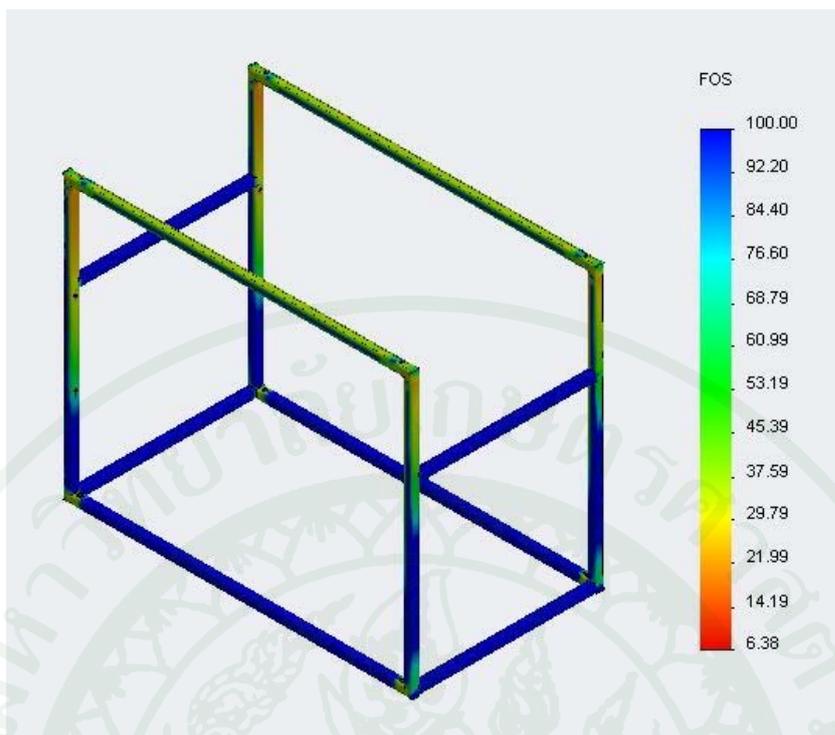
ภาพที่ 70 ผลการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นของฐานรองชุดสายพาน

ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของฐานรองชุดสายพาน

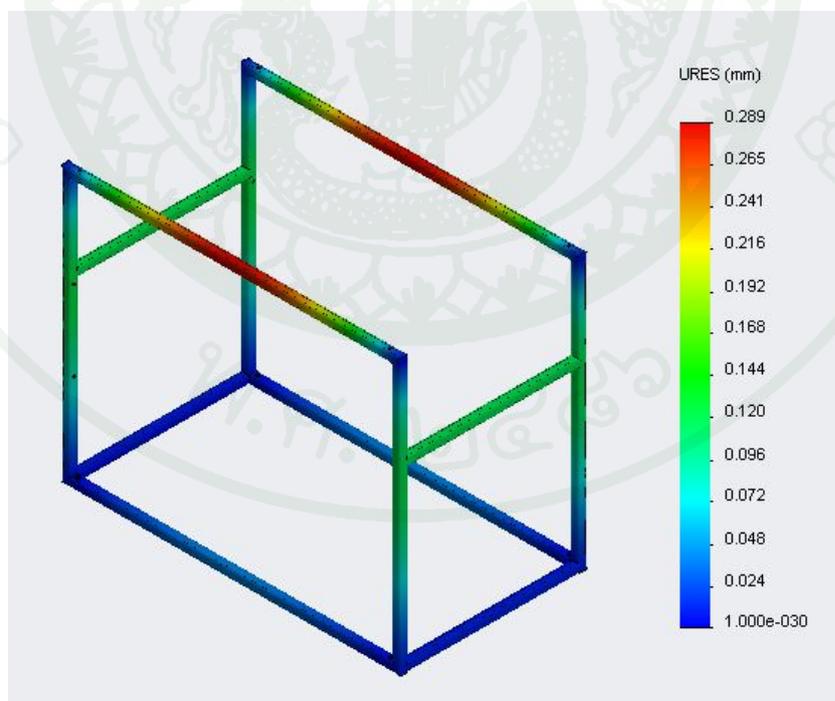
ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของฐานรองชุดสายพานได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 71 โดยค่าความปลอดภัยของฐานรองชุดสายพานมีค่าน้อยสุดอยู่ที่บริเวณมุมในด้านบนของฐานรองชุดสายพานลำเลียง ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเค้น Von Mises มากที่สุด โดยมีค่าความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 6.38 อย่างไรก็ตามค่านี้ยังให้ความปลอดภัยเพียงพอกับโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัวของฐานรองชุดสายพาน

ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของฐานรองชุดสายพานได้จัดแสดงไว้ในภาพที่ 72 จากภาพจะเห็นว่าฐานรองชุดสายพานมีระยะเคลื่อนตัวมากที่สุดบริเวณคานด้านบนของฐานรองชุดสายพาน โดยมีระยะเคลื่อนตัว 0.289 mm ถือได้ว่ามีค่าระยะเคลื่อนตัวที่น้อยมากซึ่งเป็นผลดีต่อการออกแบบโครงสร้างหลักของสายพาน



ภาพที่ 71 ผลการวิเคราะห์ความปลอดภัยของฐานรองชุดสายพาน



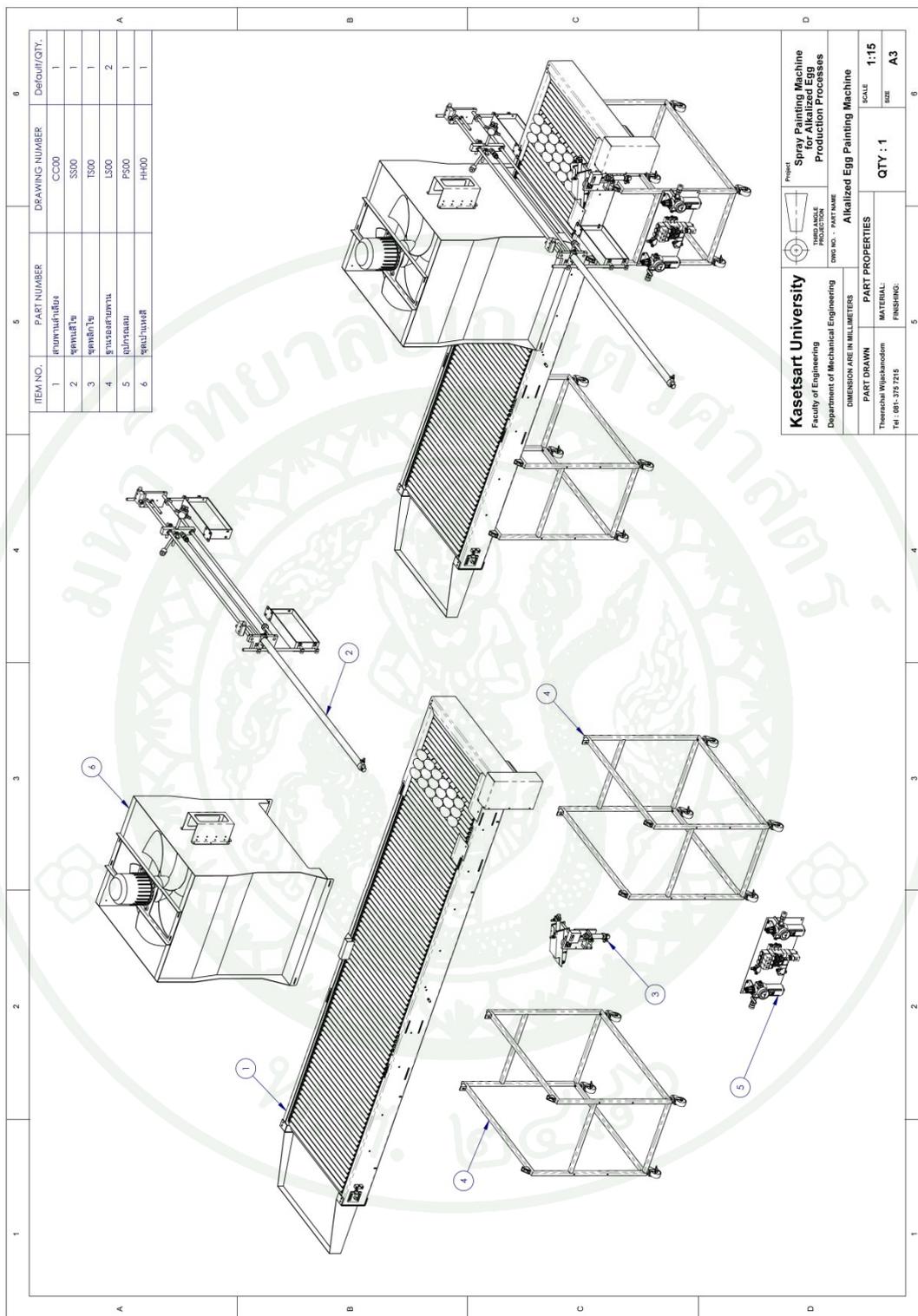
ภาพที่ 72 ผลการวิเคราะห์ระยะเคลื่อนตัว (Displacement) ของฐานรองชุดสายพาน

จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักของเครื่องพ่นสีไข่ม้วนอัตโนมัติ โดยพิจารณาแรงที่กระทำเป็นแบบแรงสถิต (Static Loading) จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (Maximum Displacement) ของโครงสร้างเครื่องพ่นสีไข่ม้วนอัตโนมัติที่ทำการวิเคราะห์มีค่าน้อยมาก ซึ่งเป็นผลดีต่อการออกแบบ กล่าวคือเมื่อเครื่องพ่นสีไข่ม้วนอัตโนมัติมีแรงมากระทำก็จะส่งผลให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อย หรือถือได้ว่าแทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเลย และเมื่อพิจารณาถึงค่าความปลอดภัยจะเห็นได้ว่ามีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้เครื่องพ่นสีไข่ม้วนอัตโนมัติสามารถทนทานต่อแรงที่กระทำดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

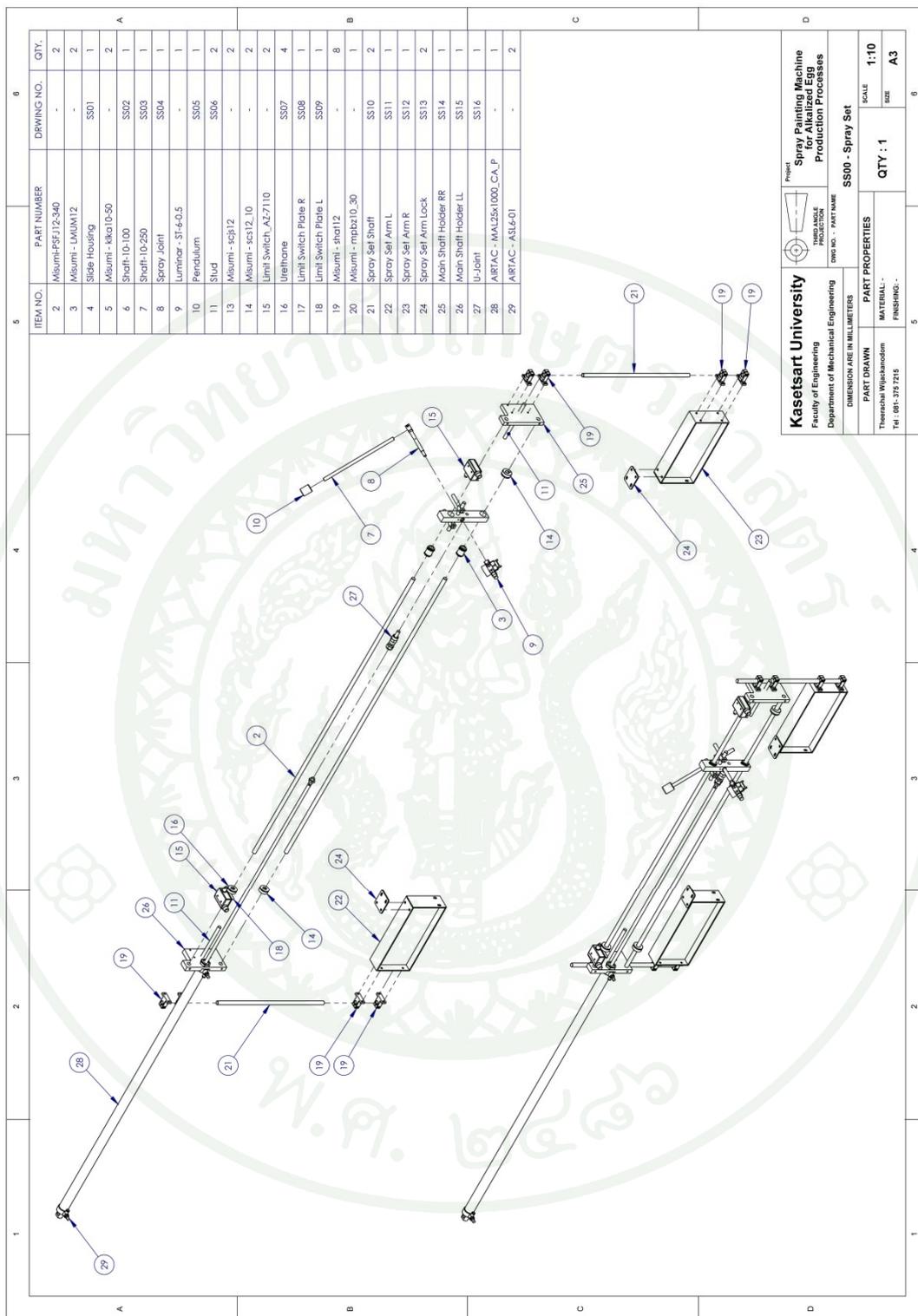
2.5 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียว

หลังจากได้ทำการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่ม้วนอัตโนมัติ และทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักแล้ว ได้ทำการจัดทำแบบพิมพ์เขียว (Mechanical Drawing) เพื่อที่จะใช้ในการดำเนินการสร้างเครื่องพ่นสีไข่ม้วนต่อไป โดยในที่นี้จะแสดงภาพรวมของเครื่องพ่นสีไข่ม้วนที่ได้ทำการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 73 ถึง 77 ดังนี้ และมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆอยู่ในภาคผนวก ค

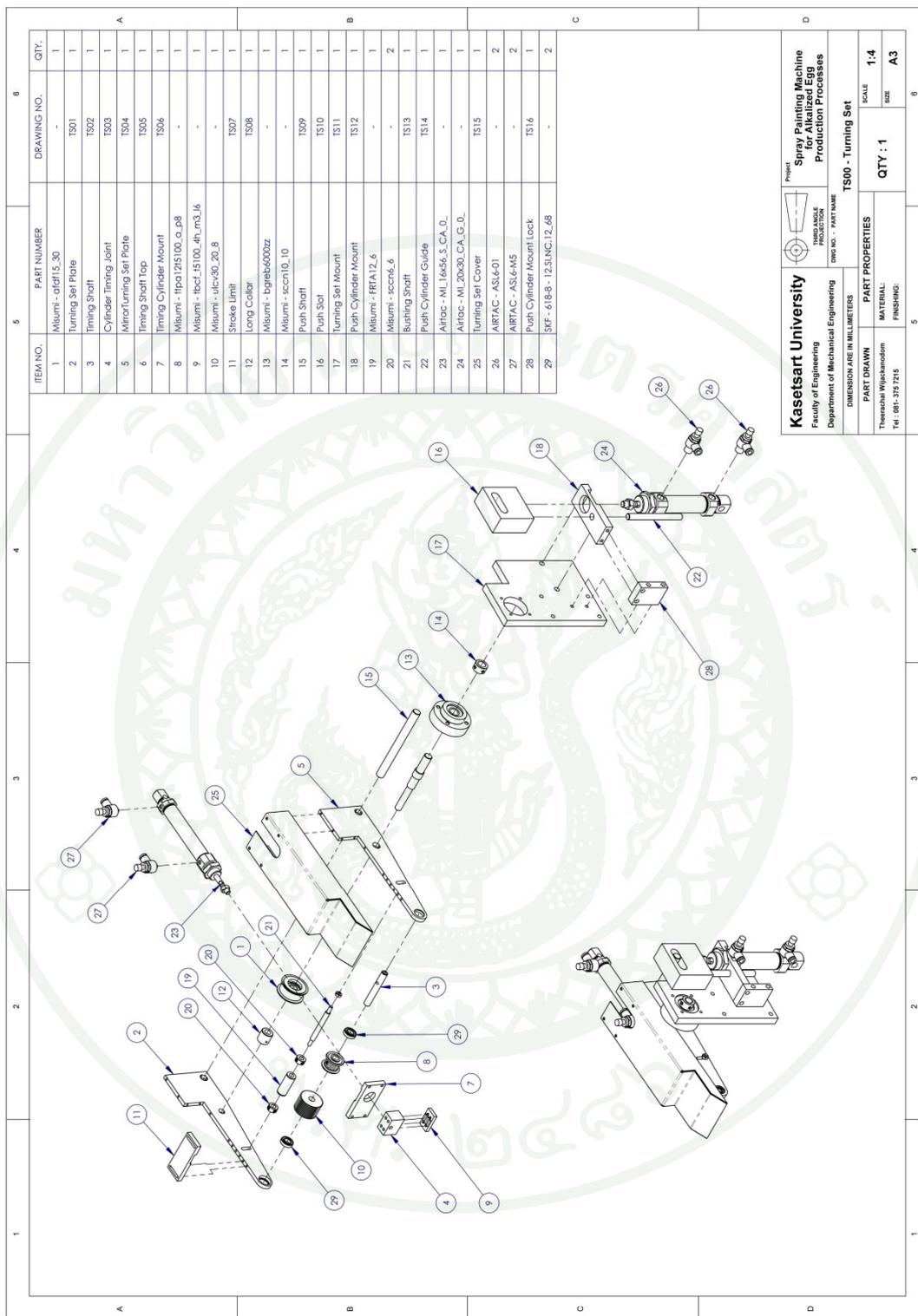
- แบบพิมพ์เขียวภาพรวมของเครื่องพ่นสีไข่ม้วนที่จะดำเนินการสร้าง
- แบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพ่นสีไข่ม้วน
- แบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพลิกไข่ม้วน
- แบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดเป่าแห้งสี
- แบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดสายพานลำเลียง



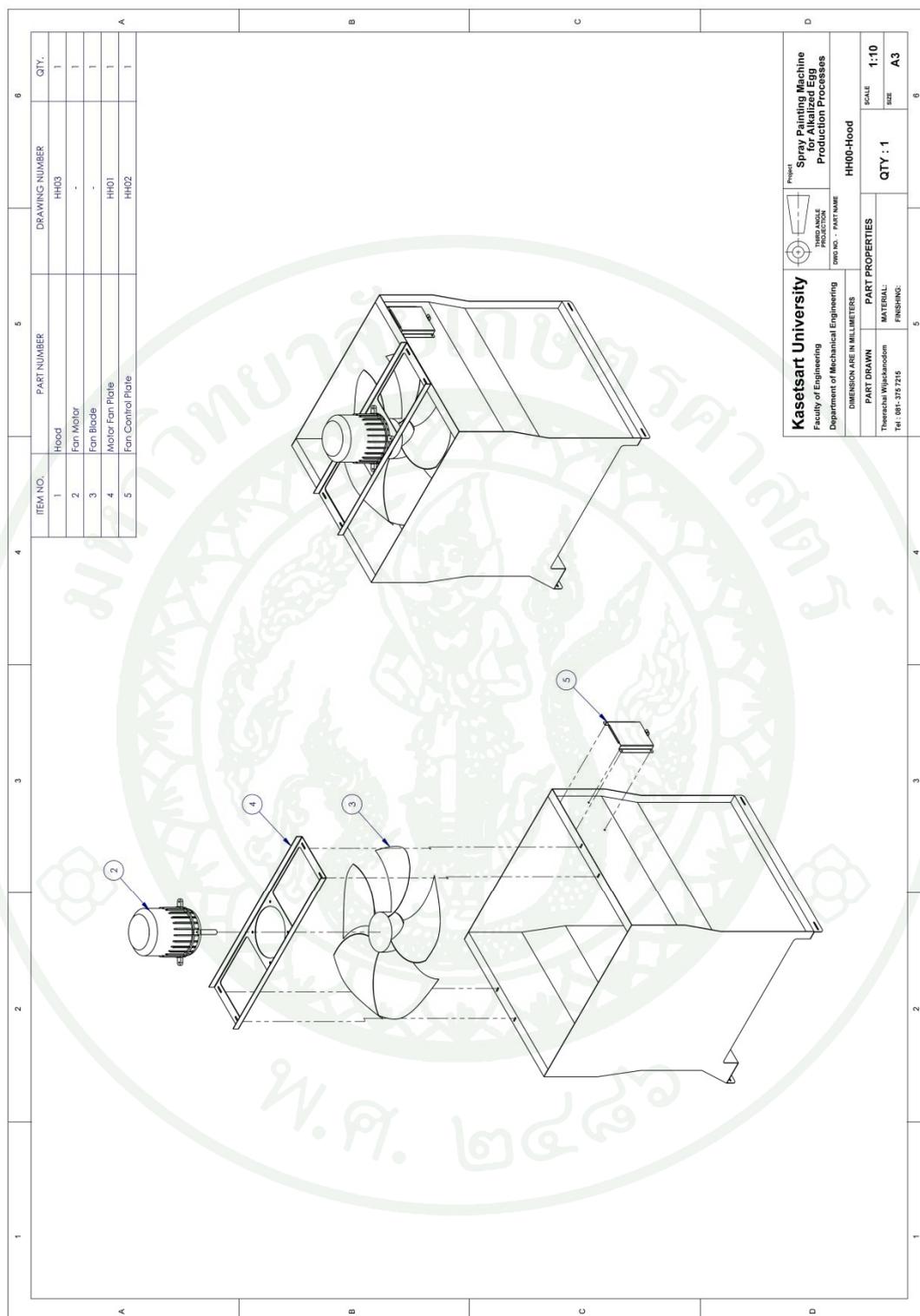
ภาพที่ 73 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของเครื่องพ่นสีไข่เชื่อมไม้ที่จะดำเนินการสร้าง



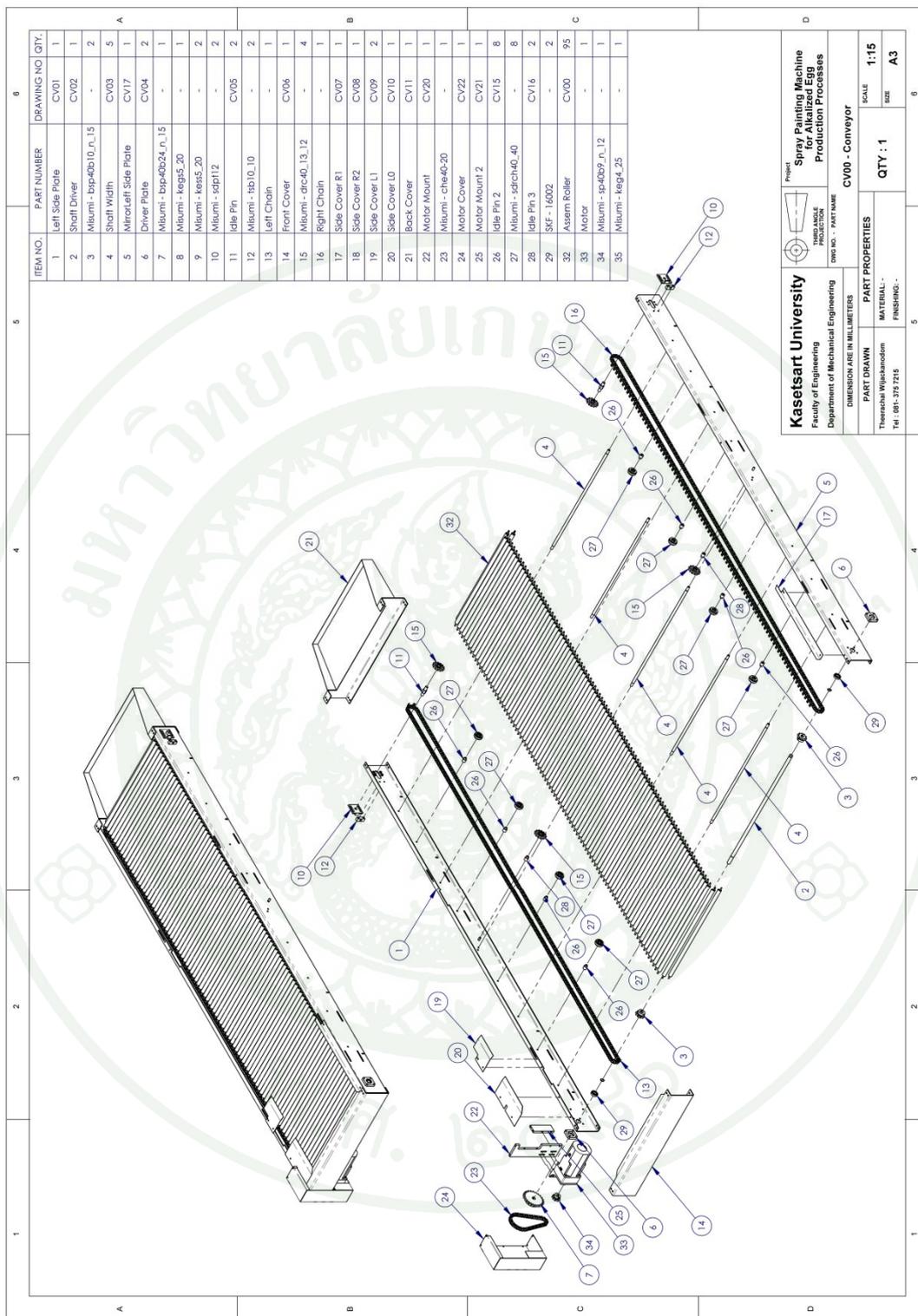
ภาพที่ 74 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพ่นสีไข่



ภาพที่ 75 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดพลิกไข่



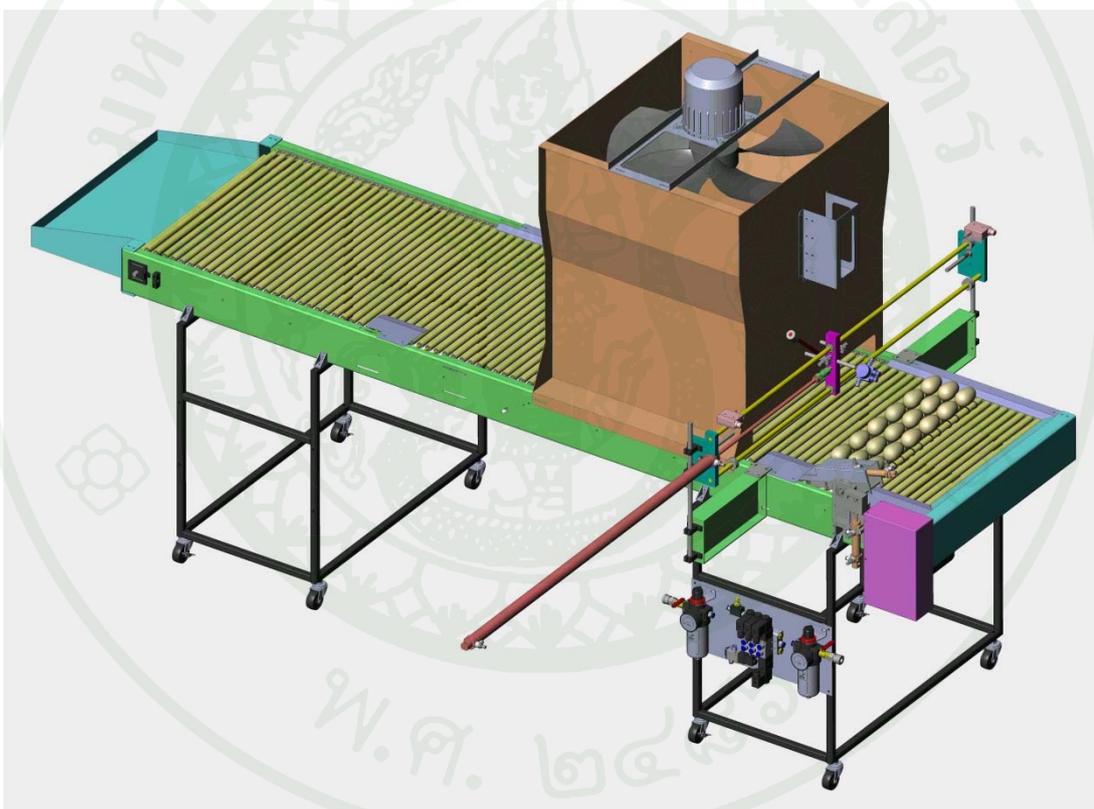
ภาพที่ 76 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดเป่าแห้งสี



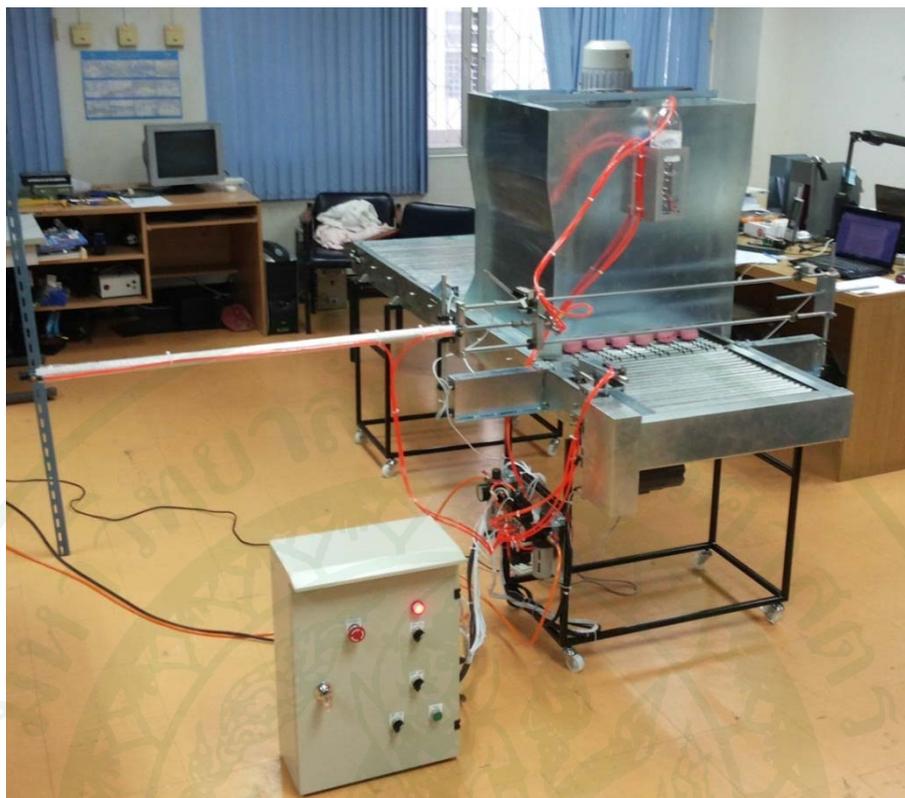
ภาพที่ 77 ผลการสร้างแบบพิมพ์เขียวภาพรวมของชุดสายพานลำเลียง

3. ผลการสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบ

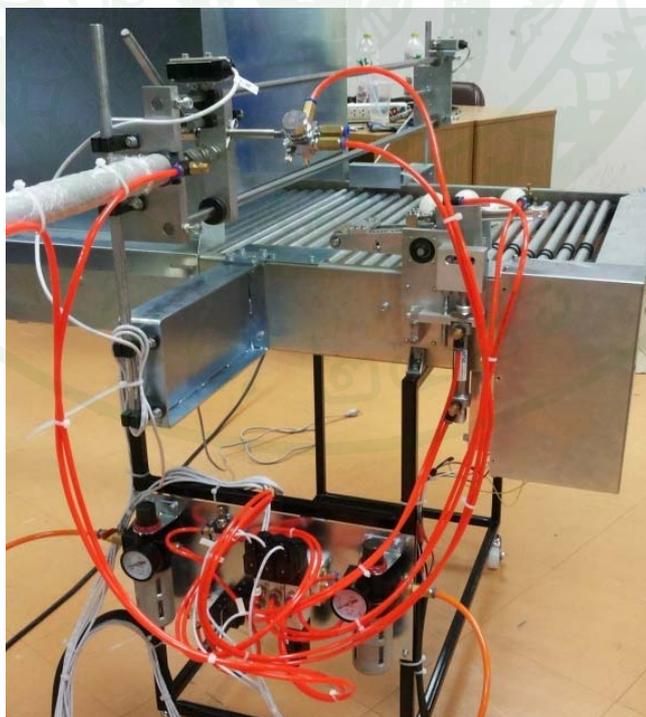
จากการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้น เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าถูกออกแบบให้มี 2 สถานี โดยแต่ละสถานีจะประกอบด้วย ชุดพลิกไข่ ชุดพ่นสีไข่ และปล่องลมจำนวน 2 ปล่องเพื่อเป่าแห้งสี สายพานลำเลียงมีความยาวรวม 3,700 mm แต่เนื่องจากงบประมาณในการสร้างเครื่องที่มีจำกัด จึงไม่สามารถสร้างเครื่องให้สมบูรณ์ตามที่ออกแบบไว้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างเครื่องเพียงบางส่วนแทน โดยส่วนที่จะทำการสร้างได้แก่ ชุดพลิกไข่ ชุดพ่นสีไข่ และปล่องลมเป่าแห้งสี จำนวนอย่างละ 1 ชุด และสายพานความยาว 2,400 mm ดังแสดงในภาพที่ 78 - 88 โดยเมื่อเครื่องสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วจะสามารถพ่นสีไข่ได้ 2 ด้านจากทั้งหมด 4 ด้านหรือคิดเป็นครึ่งฟองของไข่



ภาพที่ 78 เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่จะดำเนินการสร้างบางส่วน



ภาพที่ 79 เครื่องปั่นสียใยเชื่อมไม้ที่ดำเนินการสร้าง



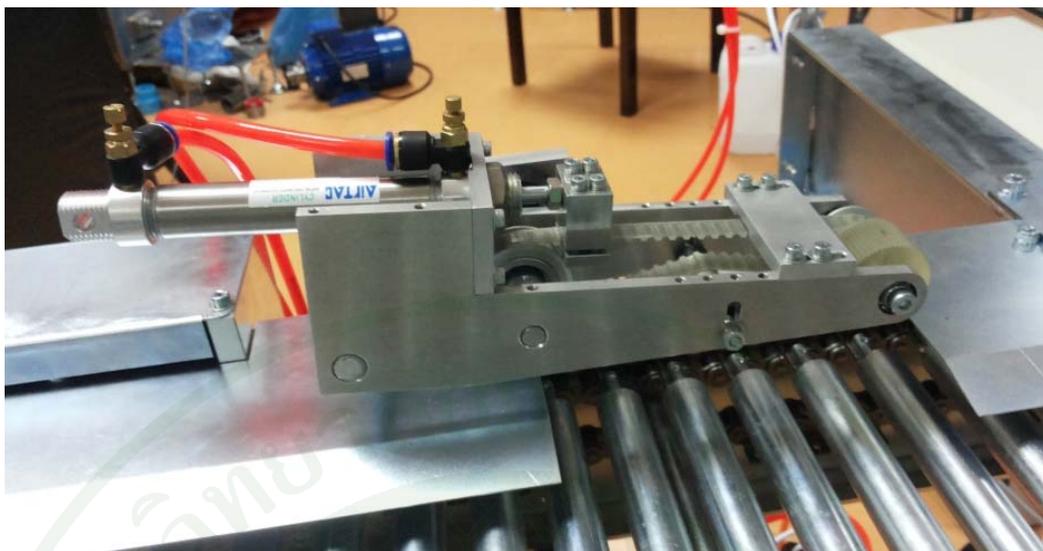
ภาพที่ 80 ผลการสร้างชุดปั่นสียใยเชื่อมไม้ของเครื่องปั่นสียใยเชื่อมไม้



ภาพที่ 81 ชุดหัวสเปรย์ของชุดพ่นสี



ภาพที่ 82 ลิ้มิตสวิทช์และ Stopper ของชุดพ่นสี



ภาพที่ 83 ผลการสร้างชุดพลิกไข่ของเครื่องฟนสีไข่เยี่ยวม้า



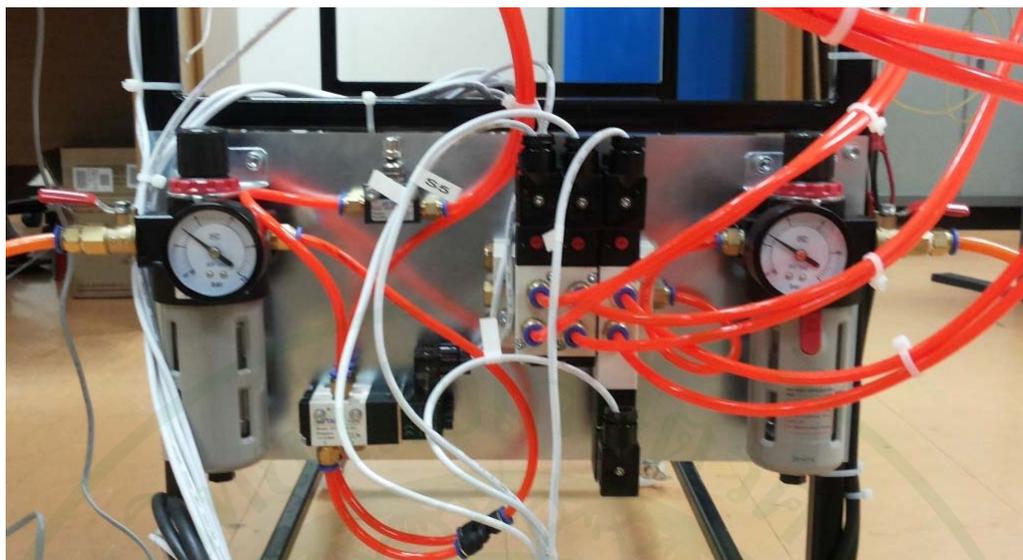
ภาพที่ 84 ผลการสร้างชุดพลิกไข่ของเครื่องฟนสีไข่เยี่ยวม้า



ภาพที่ 85 ผลการสร้างสายพานลำเลียงและถาดรองไข่ออก



ภาพที่ 86 มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง



ภาพที่ 87 อุปกรณ์ลมที่ใช้ควบคุมการจ่ายลมให้กับชุดพ่นสีและชุดพลิกไข่



ภาพที่ 88 ตู้แผงวงจรไฟฟ้า

ในการสร้างเครื่องพ่นสีไขเชื่อมมาตรฐานแบบ วัสดุที่ใช้ทำเครื่องพ่นสีไขเชื่อมมาตรฐานแบบ เป็น SS400 หรือ JIS G3101, ASTM A284 steel โดยวัสดุที่ใช้ทำตัวเครื่องมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากวัสดุที่ใช้สามารถเกิดสนิมได้ หลังการที่ขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จแล้วจึงได้ทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electro Plating) ดังแสดงในภาพที่ 89 โดยการชุบสังกะสี สังกะสีจะทำหน้าที่ป้องกันเหล็กใน 2 ทาง คือ เป็นชั้นป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อน (Barrier Protection) และผุกร่อนแทนเหล็ก (Cathodic Protection) สังกะสีมีอัตราการผุกร่อนที่ช้ามาก ดังนั้นจึงป้องกันเหล็กไม่ให้เจอกับสภาพแวดล้อมที่จะทำให้เกิดสนิมได้เป็นเวลานาน จากการศึกษารายงานของ ASTM แห่งสหรัฐอเมริกา พบว่าในเขตเมืองอัตราส่วนการผุกร่อนของสังกะสีเมื่อเทียบกับเหล็กเท่ากับ 1 : 20 และจะเท่ากับ 1 : 80 ในบริเวณชายทะเลหรือเขตอุตสาหกรรม



ภาพที่ 89 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

4. ผลการทดสอบและประเมินผลเบื้องต้น

หลังจากได้ทำการสร้างเครื่องพ่นสีไขเชื่อมมาตรฐานแล้ว จึงได้ทำการทดสอบเครื่อง โดยการนำไขมาพ่นสี ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า หลังจากที่ทำกรพ่นสีไขในด้านแรกแล้ว เมื่อชุดพลิกไขทำงาน ไขที่วางอยู่บน Roller นั้นมีการเคลื่อนที่ระหว่างที่ทำกรพลิก เนื่องจากจุดสัมผัสระหว่าง Roller กับ ไขมีเพียงจุดเดียว ทำให้ไขสามารถที่จะเลื่อนไปทางซ้ายขวาได้ เป็นผลให้ไขชนกันกับไขใบที่อยู่ใกล้กัน อีกทั้งเมื่อชุดพลิกไขหมุน Roller ไขบางฟองจะเกิดการเอียง ดังนั้นเมื่อพ่นสีด้านต่อไปแล้วจะทำให้สีที่ไขมีความไม่สม่ำเสมอ และไขที่เคลื่อนที่ไปติดกัน บริเวณที่ไขติดกันจะไม่ถูกพ่นสี ในส่วนของการทำงานของชุดพ่นสีพบว่าสีถูกพ่นออกมาจากหัวสเปรย์มีปริมาณน้อย เนื่องจากสีมีความหนืดมากจึงไหลได้ช้า ทำให้ไม่สามารถพ่นสีไขได้ทั่วทั้งด้าน

5. ผลการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบและประเมินผลเบื้องต้นพบว่าเครื่องพ่นสีไขเชื่อมม้วนแบบมีปัญหาอยู่ 2 ประการคือ การเคลื่อนที่ของไขในระหว่างที่พลิกไข และปริมาณสีที่พ่นออกมาน้อย ดังนั้นจึงได้ดำเนินการแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว โดยในส่วนของ การเคลื่อนที่ของไขในระหว่างที่พลิกไข ได้ทำการแก้ไขโดยใช้ยางกลมร้อยเข้าไปยัง Roller แต่ละอัน ดังแสดงในภาพที่ 90 โดยไขจะวางอยู่บนยางกลมทั้งสองด้านเพื่อเป็นการเพิ่มจุดสัมผัสให้กับไข และในส่วนของปัญหาปริมาณสีที่พ่นออกมาน้อย ได้ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มขนาดของสายสี จากเดิมสายสีมีขนาด 6 mm ได้ทำการเพิ่มสายเป็นขนาด 8 mm



ภาพที่ 90 การแก้ไขปัญหาการเคลื่อนที่ของไขโดยการใส่ยางกลมที่ Roller

6. ผลการทดสอบและประเมินผลขั้นสุดท้าย

หลังจากที่ได้แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทดสอบและประเมินผลเบื้องต้นแล้ว จึงได้ทำการทดสอบและประเมินผลขั้นสุดท้าย จากการทดสอบพบว่าเครื่องพ่นสีไขเชื่อมม้วนแบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยสามารถพ่นสีไขได้สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 91 และ 92



ภาพที่ 91 ไข่หลังจากออกจากชุดเป่าแห้งสี



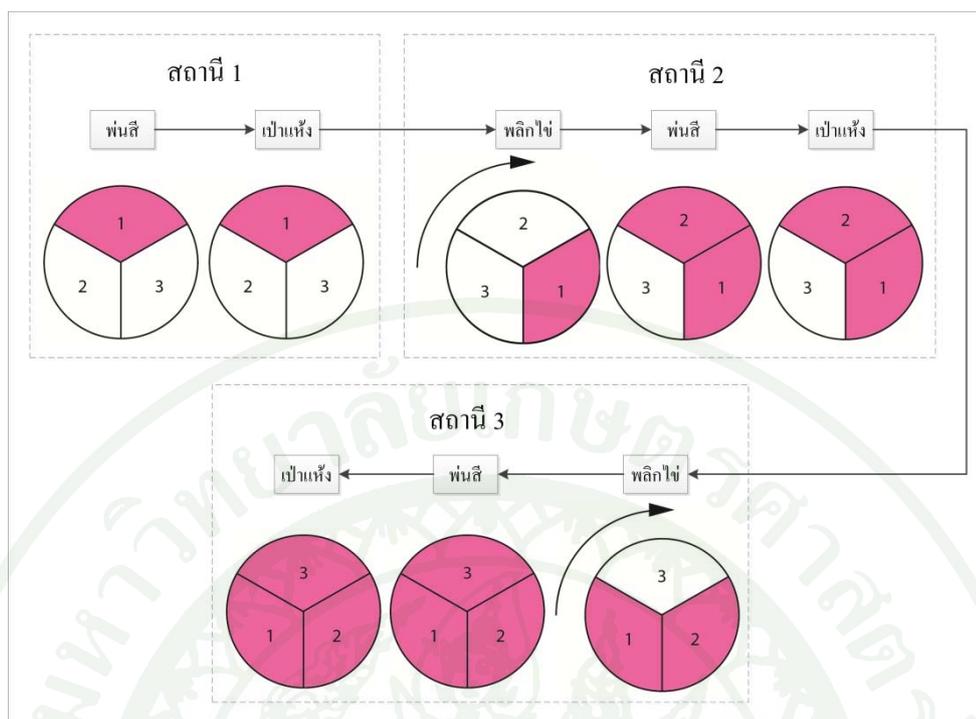
ภาพที่ 92 ไข่หลังจากพ่นสีด้วยเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบ

อัตราการผลิตของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการพ่นสีไข่แต่ละแถว โดยความเร็วในการพ่นสีไข่แต่ละแถวจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวสเปรย์ การพลิก และการเคลื่อนที่ของไข่ โดยความเร็วของหัวสเปรย์จะเป็นหัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความเร็วในการพ่นสีไข่ในแต่ละแถว เนื่องจากใช้ระยะเวลามาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับให้หัวสเปรย์เคลื่อนที่เร็วที่สุด โดยยังสามารถพ่นสีไข่ได้ทั่วทั้งฟอง โดยการปรับปริมาณสี และปริมาณลมให้มีความเหมาะสมกับความเร็วของหัวสเปรย์ที่ตั้งไว้ พบว่าเมื่อปรับความเร็วของหัวสเปรย์ให้เหมาะสมแล้ว เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบสามารถพ่นสีไข่ได้ในอัตรา 6 ฟองต่อ 18 วินาทีหรือคิดเป็นเพียง 10,000 ฟองต่อวัน (คิดจากชั่วโมงทำงาน 8 ชั่วโมง) จากเดิมที่วางแผนที่จะออกแบบไว้ 30,000 ฟองต่อวัน ซึ่งในการพ่นสีไข่หนึ่งด้านจะใช้ระยะเวลาประมาณ 7.5 วินาที ส่วนการพลิกไข่ และเคลื่อนไข่เข้าตำแหน่งพ่นจะใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที และมีระยะห่างระหว่างไข่ที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถพ่นสีไข่ด้านข้างได้ประมาณ 1 cm

จากภาพที่ 92 จะเห็นว่าไข่หลังจากพ่นสีแล้วจะเหลือพื้นที่ที่ยังไม่ถูกพ่นสีคิดเป็นเพียง 1 ใน 3 ของพื้นที่เนื่องจากในขณะที่ไข่ที่อยู่ในตำแหน่งพ่นสีถูกพ่นสี ไข่แถวที่อยู่ก่อนและหลังตำแหน่งพ่นจะถูกละอองสีบางส่วนด้วย ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่ไข่ที่ถูกพ่นสีมากกว่าที่ได้ออกแบบไว้

ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มอัตราการผลิตของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า จากเดิมที่ออกแบบให้พ่นสีไข่ทั้งหมด 4 ครั้งหรือแบ่งไข่เป็น 4 ด้าน จึงควรเปลี่ยนให้พ่นสีไข่ทั้งหมดเพียง 3 ครั้งหรือแบ่งไข่เป็น 3 ด้าน โดยเพิ่มให้เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้ามีสถานีพ่นสีทั้งหมด 3 ด้านและพ่นสีสถานีละหนึ่งด้าน เนื่องจากการออกแบบที่วางไว้เดิมในหนึ่งสถานีจะพ่นสีไข่ทั้งหมด 2 ด้านทำให้ต้องใช้เวลาพ่นสีในหนึ่งสถานีมาก และย้ายตำแหน่งจุดพลิกไข่ให้อยู่คนละตำแหน่งกับตำแหน่งพ่นสีไข่ โดยให้ไข่ที่จะเข้าไปยังตำแหน่งพ่นสีถูกพลิกด้านไว้ก่อน เพื่อที่จะลดเวลาในการพลิกไข่ก่อนที่จะพ่นสี

การทำงานของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบที่ออกแบบใหม่ได้แสดงในภาพที่ 93 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ ขั้นแรกไข่จะเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งพ่นสีที่สถานีที่ 1 จากนั้นทำการพ่นสีและเลื่อนไปเป่าแห้งตามลำดับ จากนั้นไข่จะถูกลำเลียงเข้าไปยังสถานีที่ 2 ในสถานีนี้ไข่จะถูกเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งพลิกไข่เพื่อทำการพลิกด้านที่สองซึ่งยังไม่ถูกพ่นสีขึ้นมาด้านบน จากนั้นไข่จะถูกเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งพ่นสีเพื่อพ่นสีไข่ด้านที่สอง และเคลื่อนเข้าไปยังปล่องลมเป่าแห้งสี หลังจากไข่ถูกพ่นสีสองด้านแล้วจะเคลื่อนเข้าไปยังสถานีที่ 3 เพื่อทำการพ่นสีด้านที่เหลือ โดยสถานีที่สามจะมีลักษณะการทำงานเหมือนสถานีที่สอง ไข่ที่ผ่านสถานีที่สามแล้วจะถูกพ่นสีครบทั้งฟอง และถูกลำเลียงออกมาทางถาดรับไข่ด้านท้ายเครื่อง



ภาพที่ 93 การทำงานของเครื่องฟั่นสีไขเยี่ยวม้าต้นแบบที่ออกแบบใหม่

จากการทำงานของเครื่องฟั่นสีไขเยี่ยวม้าต้นแบบที่ออกแบบใหม่สามารถคำนวณอัตราการผลิตของเครื่องฟั่นสีไขเยี่ยวม้าได้จากระยะเวลาในการฟั่นสีไขหนึ่งด้าน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 7.5 วินาที และการเลื่อนไขซึ่งใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที ดังนั้นจะได้อัตราการผลิตใหม่เป็น 6 ฟองต่อ 9 วินาทีหรือ 20,000 ฟองต่อวัน ซึ่งมากกว่าอัตราการผลิตเดิมเท่าตัว และสามารถที่จะเพิ่มอัตราการผลิตได้อีก โดยการเพิ่มจำนวนไขต่อแถว ซึ่งจะต้องเพิ่มความยาวของกระบอกลมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของชุดหัวสเปร์ย์ และเพิ่มความยาวของ Roller แต่ละตัว

และจากการทดสอบในขั้นสุดท้ายพบว่า เมื่อใช้งานเครื่องฟั่นสีไขเยี่ยวม้าไปได้ระยะเวลาหนึ่ง สีที่ฟั่นออกมาจะเกาะตัวบริเวณขอบของเครื่องและบริเวณ Roller ดังแสดงในภาพที่ 94 โดยสีจะเกาะตัวหนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการทำงานของเครื่อง ดังนั้นจึงควรทำความสะอาดเครื่องเมื่อใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่ง โดยการทำมาสะอาดอาจทำได้โดยการใช้น้ำฉีดล้าง เนื่องจากสีที่ใช้สามารถที่จะละลายน้ำได้



ภาพที่ 94 การเกาะตัวของสีที่ Roller และตัวเครื่อง

7. ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

จากการทดสอบและประเมินผลเครื่องพ่นสีไข่ม้วนมาตรฐานแบบที่ได้ดำเนินการสร้างไปบางส่วน หากทำการสร้างเครื่องให้แล้วเสร็จตามที่ได้ออกแบบการทำงานของเครื่องไว้ใหม่แล้ว เครื่องพ่นสีไข่ม้วนจะสามารถพ่นสีไข่ม้วนได้ในอัตรา 20,000 ฟองต่อวัน โดยใช้คนงานจำนวน 2 คน ในการป้อนไข่ม้วนและนำไข่ม้วนออกจากเครื่อง กำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำงานปีละ 240 วัน จะสามารถประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาทต่อจำนวนไข่ม้วนหนึ่งฟอง) และระยะเวลาคืนทุนของเครื่องพ่นสีไข่ม้วนมาตรฐานได้ดังนี้

7.1 ผลการวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน

ค่าใช้จ่ายในการทำงานสามารถคำนวณได้จาก ต้นทุนคงที่ (Fix Cost) และต้นทุนแปรผัน (Variable Cost) ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fix Cost)

- ค่าเสื่อมราคา (Depreciation, DP) คิดค่าเสื่อมราคา (DP) แบบ Straight-line method

$$\text{จาก} \quad DP = (P-S)/L \quad (69)$$

| | | |
|--------|----|---|
| โดยที่ | DP | คือ ค่าเสื่อมราคา (บาท) |
| | P | คือ ราคาซื้อของเครื่องจักร (บาท) |
| | S | คือ ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท) |
| | L | คือ อายุการใช้งานของเครื่อง (ปี) |

ราคาเครื่องที่ประเมินไว้จากตารางผนวกที่ ก1 เท่ากับ 386,000 บาท มูลค่าซากของเครื่องเมื่อสิ้นปีที่ 10 เหลือ 10% ของราคาเครื่อง

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{ราคาซากเครื่อง} &= 0.1 \times 386,000 = 38,600 \text{ บาท} \\ \text{ค่าเสื่อมราคา} &= (386,000 - 38,600) \div 10 = 34,740 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (Interest on Investment)

$$\text{จาก} \quad I = (P+S) \div 2 \times i \div 100 \quad (70)$$

โดยที่ I คือ ค่าเสียโอกาสต่อปี (บาท)

i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)

กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 3% จากอัตราดอกเบี้ยประจำวันของธนาคารพาณิชย์ในประเทศไทย ณ วันที่ 15/3/2557

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{ค่าเสียโอกาสต่อปี} &= (386,000 + 38,600) \div 2 \times 3 \div 100 \\ &= 6,369 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

$$\text{รวมแล้วต้นทุนคงที่ต่อปี (Fix Cost) = 34,740 + 6,369 = 41,109 \text{ บาท}}$$

ต้นทุนแปรผัน

- ค่าบำรุงรักษา (Repair and Maintenance) คิดเฉลี่ยประมาณวันละ 50 บาท ทำงานปีละ 240 วัน คิดเป็นค่าบำรุงรักษา 12,000 บาทต่อปี

- ค่าไฟฟ้า ใช้มอเตอร์ขนาด 90 W จำนวน 1 ตัว พัดลมขนาด 199 W จำนวน 6 ตัว รวมเป็น 1.284 kW ราคาค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3 บาท ทำงานวันละ 8 ชั่วโมงต่อวัน 240 วันต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ $1.284 \times 3 \times 8 \times 240 = 7,396$ บาทต่อปี

- ค่าจ้างแรงงาน อัตราค่าแรงงานวันละ 300 บาท จำนวน 2 คน ทำงาน 240 วันต่อปี คิดเป็นค่าแรงงานเท่ากับ $300 \times 240 \times 2 = 144,000$ บาทต่อปี

รวมต้นทุนแปรผัน = $12,000 + 7,396 + 144,000 = 163,369$ บาทต่อปี

คิดต้นทุนในการใช้เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า โดยรวมต้นทุนคงที่กับต้นทุนแปรผันเท่ากับ $163,369 + 41,109 = 204,478$ บาทต่อปี

ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาทต่อจำนวนไข่หนึ่งฟอง) ของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ทำงานเฉลี่ยใน 1 ปีเท่ากับ 240 วัน เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบสามารถพ่นสีไข่ได้ในอัตรา 20,000 ฟองต่อวัน จะได้เท่ากับ $204,478 \div 20,000 \div 240 = 0.0426$ บาทต่อฟอง หรือ 4.26 บาทต่อ 100 ฟอง

7.2 ผลการวิเคราะห์และประเมินระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า เมื่อมีการทำงาน 240 วัน วันละ 8 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนรวม} &= \text{ต้นทุนแปรผัน} + \text{ดอกเบี้ย} & (71) \\ &= 163,369 + 6,369 \\ &= 169,738 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

โดยผลประโยชน์ที่ได้รับคือ ค่าจ้างแรงงานที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรพ่นสีไข่แบบเดิม โดยการผลิตแบบเดิมจะใช้แรงงานคน 10 คน ได้อัตราการผลิตอยู่ที่ 25,000 ฟองต่อวัน ค่าแรงงานเท่ากับ 300 บาทต่อวัน ดังนั้นจะได้ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาทต่อจำนวนไข่หนึ่งฟอง) เท่ากับ $300 \times 10 \div 25,000 = 0.12$ บาทต่อฟอง หรือคิดเป็น 12 บาทต่อ 100 ฟอง ในหนึ่งปีเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าสามารถผลิตไข่ได้เท่ากับ $20,000 \times 240 = 4,800,000$ ฟอง เมื่อเทียบกับในอัตราการผลิตที่เท่ากันแล้ว การพ่นสีไข่แบบเดิมจะมีค่าใช้จ่าย 576,000 บาทต่อปี

$$\begin{aligned} \text{ผลประโยชน์ที่ได้รับ} &= 576,000 - 204,478 \\ &= 371,522 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ผลประโยชน์สุทธิ} &= \text{ผลประโยชน์ที่ได้รับ} - \text{ต้นทุนรวม} \quad (72) \\ &= 371,522 - 169,738 \\ &= 201,784 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{ราคาซื้อเครื่อง} \div \text{ผลประโยชน์สุทธิ} \quad (73) \\ &= 386,000 \div 201,784 \\ &= 1 \text{ ปี } 11 \text{ เดือนโดยประมาณ} \end{aligned}$$



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า การพ่นสีบริเวณเปลือกไข่เยี่ยวม้าเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่ง นอกจากเพื่อเพิ่มความสวยงามแล้วการพ่นสียังช่วยรักษาค่าความเป็นกรดค้างของไข่เยี่ยวม้า ในระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง ทำให้คุณภาพของไข่เยี่ยวม้าไม่เปลี่ยนแปลง ในการผลิตไข่เยี่ยวม้าแบบเดิม คนงานจะพ่นสีไข่แล้วทิ้งไว้เพื่อรอให้แห้ง ในช่วงหน้าร้อนอากาศจะแห้งทำให้ไข่เยี่ยวม้าที่ถูกพ่นสีแห้งเร็วกว่าช่วงฤดูฝน เนื่องจากช่วงฤดูฝนมีปริมาณไอน้ำในอากาศมากกว่า ทำให้ได้กำลังการผลิตต่อวันไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งการใช้แรงงานคนในการพ่นสีทำให้คุณภาพการพ่นสีของไข่แต่ละฟองไม่เท่ากัน

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าต้นแบบขึ้น เพื่อให้ได้อัตราการผลิตที่สม่ำเสมอ และคุณภาพสีของไข่เยี่ยวม้าที่มีความสม่ำเสมอ รวมไปถึงช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงานให้กับทางผู้ประกอบการ โดยกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบให้เครื่องมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 30,000 ฟองต่อวัน ในการออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า ได้มีการนำโปรแกรมในด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการวิเคราะห์การเกาะตัวของสีบนเปลือกไข่ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า โดยมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยการใช้โปรแกรมทางด้าน Image Processing เข้ามาช่วย จากการวิเคราะห์การพ่นสีด้วยโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพบว่าควรพ่นสีโดยแบ่งไข่ทั้งหมดเป็น 4 ด้านและแต่ละด้านควรพ่นสีไปและกลับโดยที่หัวสเปรย์ทำมุม 45 องศากับแกนนอน จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า และคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้างหลักที่สำคัญด้วยกระบวนการวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการออกแบบเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้า เครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าถูกออกแบบให้มีสถานีพ่นสีจำนวน 2 สถานีโดยแต่ละสถานีจะทำการพ่นสีไข่ 2 ด้าน ในแต่ละสถานีพ่นสีจะประกอบด้วย ชุดพ่นสีไข่ ชุดพลิกไข่ และชุดเป่าแห้งสี ไข่จะถูกลำเลียงไปโดยสายพานลำเลียงซึ่งมีไซ้และ Roller เป็นส่วนประกอบ และขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบมีเบรกพร้อมเกียร์ทดขนาด 90 W เครื่องที่ทำการออกแบบมีความยาวรวม 4 เมตร โดยมีถาดรองรับไข่อยู่ที่ด้านท้ายเครื่อง จากนั้นจึงดำเนินการทำแบบพิมพ์เขียวและสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่เนื่องจากเครื่องที่ออกแบบมี

ขนาดใหญ่ อีกทั้งส่วนประกอบต่าง ๆ มีจำนวนมาก ด้วยงบประมาณที่มีจำกัดจึงทำให้สามารถที่จะสร้างเครื่องได้เพียงบางส่วน โดยได้ทำการสร้างเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าโดยมีสถานีเพียงสถานีเดียว ซึ่งจากที่ได้ทำการออกแบบไว้สามารถที่จะพ่นสีไข่ได้ครึ่งฟอง

หลังจากนั้น ได้ดำเนินการทดสอบเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ดำเนินการสร้าง ผลจากการทดสอบในเบื้องต้นพบว่าเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้ามีปัญหาในการพลิกไข่ โดยเมื่อซูดพลิกไข่ทำการหมุนไข่แล้ว ไข่เกิดการเคลื่อนที่ไปชิดกับใบที่อยู่ใกล้กัน ทำให้ไม่สามารถพ่นสีไข่ได้ทั่วถึง และมีปัญหาในด้านการพ่นสีคือ สีที่พ่นออกมาปริมาณน้อย เนื่องจากสีมีความหนืดสูง ดังนั้นจึงได้ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มยางวงกลมเข้าไปที่ Roller เพื่อไม่ให้ไข่เคลื่อนที่ในขณะที่พลิกไข่ และเพิ่มขนาดของสายสีให้สีสามารถไหลได้ดีขึ้น จากนั้นจึงดำเนินการทดสอบและประเมินผลในขั้นสุดท้าย พบว่าเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าสามารถทำงานได้เป็นปกติตามที่ออกแบบไว้แต่มีอัตราการผลิตที่ต่ำกว่าเกณฑ์ในการออกแบบที่ตั้งไว้ โดยมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 10,000 ฟองต่อวัน จึงได้ทำการออกแบบการทำงานของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าใหม่ เพื่อให้มีอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดสอบเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าในขั้นสุดท้ายพบว่าไข่ที่ผ่านการพ่นสี 2 ด้านมีพื้นที่ที่ถูกพ่นสีประมาณ 2 ใน 3 ส่วน ดังนั้นจึงออกแบบการพ่นสีของเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าใหม่ โดยแบ่งไข่ทั้งหมดเป็น 3 ด้านและให้มีสถานีพ่นสีจำนวน 3 สถานี จากการคำนวณเมื่อเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าได้ทำการสร้างจนเสร็จสมบูรณ์โดยมีการทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ใหม่ จะสามารถที่จะพ่นสีไข่เยี่ยวม้าได้ในอัตรา 20,000 ฟองต่อวัน และผลจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าที่ออกแบบมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1 ปี 11 เดือน

ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดสอบและประเมินผลในขั้นสุดท้ายพบว่า เมื่อใช้งานเครื่องพ่นสีไข่เยี่ยวม้าไปได้ระยะเวลาหนึ่ง สีจะเกาะตัวบริเวณขอบของเครื่องและบริเวณ Roller โดยสีจะเกาะตัวหนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการทำงานของเครื่อง ดังนั้นจึงควรทำความสะอาดเครื่องเมื่อใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่ง โดยการทำความสะอาดอาจทำได้โดยการใช้น้ำฉีดล้าง เนื่องจากสีที่ใช้สามารถที่จะละลายน้ำได้ แต่เนื่องจากที่ Roller มีการใส่ยางวงกลมไว้เพื่อทำความสะอาดอาจทำให้ยางที่ใส่ไว้เคลื่อนที่ และส่งผลต่อการหมุนของไข่ จึงควรที่จะหาวิธียึดยางให้ติดไว้กับ Roller อย่างถาวร เช่น การบากร่องของ Roller ไว้สำหรับสวมยาง หรือเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ Roller เป็นแบบอื่น ๆ ที่สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม

2. เพื่อที่จะเพิ่มอัตราการผลิตของเครื่องพ่นสีไขเชื่อมมาให้มากขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนไขที่วางอยู่ต่อแถวให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะต้องเพิ่มความยาวของ Roller และกระบอบกลมให้มากขึ้น รวมไปถึงปล่องลมที่อาจจะต้องมีความกว้างเพิ่มขึ้นด้วย
3. การฟุ้งกระจายของสีที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของเครื่องพ่นสีไขเชื่อม อาจแก้ไขได้โดยการติดปล่องลมดูดอากาศที่บริเวณชุดพ่นสีไข แต่ถึงอย่างไรก็ตามผู้ปฏิบัติงานก็ควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันทุกครั้งทำงาน เพื่อป้องกันการสูดดมละอองสีเข้าไป
4. ระยะเวลาในการแห้งของสีบนเปลือกไขขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความหนาของสีที่พ่นลงบนเปลือกไข อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในขณะนั้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ไขที่เคลื่อนที่ผ่านชุดพ่นสีไขแห้งสนิท จึงควรสังเกตไขที่กำลังจะออกจากชุดเป่าแห้งสีว่าสามารถแห้งได้ทันหรือไม่ และปรับการนำเวลาให้เหมาะสม ทั้งนี้การนำเวลาจะทำให้เวลาที่ใช้ในการพ่นสีไขในแต่ละแถวเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ได้อัตราการผลิตลดลง ดังนั้นการปรับระยะเวลาแห้งจึงควรที่จะปรับให้ไขที่ออกมาจากชุดเป่าแห้งสีแห้งพอดี
5. การพ่นสีไขในเครื่องพ่นสีไขเชื่อมจะให้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวสเปรย์ ปริมาณและความดันของลมที่จ่ายให้กับหัวสเปรย์ ปริมาณของสี และความกว้างของสีที่พ่น ดังนั้นจึงควรปรับค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาให้มีความเหมาะสม โดยให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวสเปรย์ให้มากที่สุด เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการผลิตของเครื่อง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จันทร์จิรา สีนทะโยธิน. 2555. แบบจำลอง RGB และ HSI, น. 321-344. ใน จุฑามาศ ตั้งจิตทวีชัย, บรรณาธิการ. **การประยุกต์ใช้ MATLAB**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

บริษัท เอส เค เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด. 2542. **คู่มือตลับลูกปืน**. หจก.นิเวศการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. 2545. **ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ปิยวุฒิ แก้วฤทธิ์. 2552. **การปรับปรุงกระบวนการพ่นเส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิรัช อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. 2545. **การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1**. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

วิรัช อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน. 2541. **การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2**. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. **การออกแบบเครื่องกลและชิ้นส่วนเครื่องจักร 1**. 2547. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

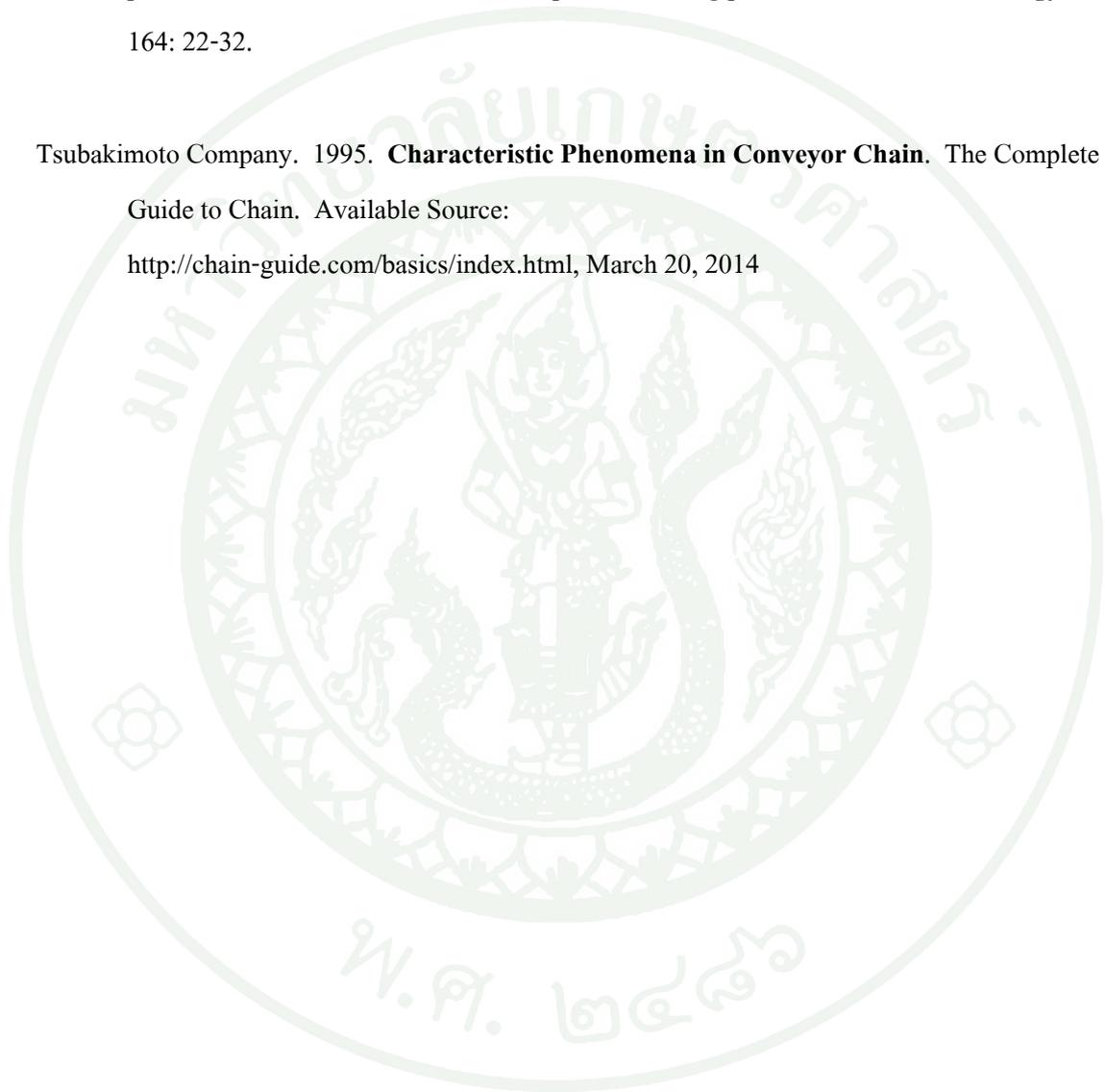
Airtac Enterprise Company Limited. 2008. **Airtac Pneumatic Equipment**. n.p.

Mazur, Z., R. Compos-Amezcu, G. Urquiza-Beltran and A. Gutierrez. 2004. Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine. **Applied Thermal Engineering** 24: 1877-1891.

Misumi Company Limited. 2010. **Mechanical Standard Component for Factory Automation.** n.p.

Shah, U., J. Zhu, C. Zhang and J.H. Nother Senior. 2006. Numerical investigation of coarse powder and air flow in an electrostatic powder coating process. **Powder Technology** 164: 22-32.

Tsubakimoto Company. 1995. **Characteristic Phenomena in Conveyor Chain.** The Complete Guide to Chain. Available Source:
<http://chain-guide.com/basics/index.html>, March 20, 2014







ภาคผนวก ก
ตารางผนวก

ตารางผนวกที่ ก1 ขนาดลิ้มมาตรฐานที่ใช้กับเพลานขนาดต่างๆ

| ขนาดเพลาน (d) mm | ลิ้มสี่เหลี่ยมผืนผ้า | ลิ้มแบน | แซกเดิลคีย์ Din 6881 (b x h) | ลิ้มวงเดือน | | |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| | ลิ้มสี่เหลี่ยมจัตุรัส | ISO 2491 | | ISO 3912 | | |
| | ISO / R 773 ISO / R774 (b x h) | ISO 2492 (b x h) | | b x h ₁ x R | t ₁ | t ₂ |
| 3 - 4 | | | | 1.0 x 1.40 x 4 | 1.0 | 0.6 |
| 4 - 5 | | | | 1.5 x 2.60 x 7 | 2.0 | 0.8 |
| 5 - 6 | | | | 2.0 x 2.60 x 7 | 1.8 | 1.0 |
| 6 - 7 | 2 x 2 | | | 2.0 x 2.60 x 10 | 2.9 | 1.0 |
| 7 - 8 | 2 x 2 | | | 2.5 x 3.70 x 10 | 2.7 | 1.2 |
| 8 - 10 | 3 x 3 | | | 3.0 x 5.00 x 13 | 3.8 | 1.4 |
| 10 - 12 | 4 x 4 | | | 3.0 x 6.50 x 16 | 5.3 | 1.4 |
| 12 - 14 | 5 x 5 | 5 x 3 | | 4.0 x 6.5 x 16 | 5.0 | 1.8 |
| 14 - 16 | 5 x 5 | 5 x 3 | | 4.0 x 7.50 x 19 | 6.0 | 1.8 |
| 16 - 18 | 5 x 5 | 6 x 4 | | 5.0 x 6.50 x 16 | 4.0 | 2.3 |
| 18 - 20 | 6 x 6 | 6 x 4 | | 5.0 x 7.50 x 19 | 5.5 | 2.3 |
| 20 - 22 | 6 x 6 | 6 x 4 | | 5.0 x 9.00 x 22 | 7.0 | 2.3 |
| 22 - 25 | 8 x 7 | 8 x 5 | 8 x 3.5 | 6.0 x 9.00 x 22 | 6.5 | 2.8 |
| 25 - 28 | 8 x 7 | 8 x 5 | 8 x 3.5 | 6.0 x 10.00 x 25 | 7.5 | 2.8 |
| 28 - 32 | 8 x 7 | 8 x 5 | 8 x 3.5 | 8.0 x 11.00 x 28 | 8.0 | 3.3 |
| 32 - 38 | 10 x 8 | 10 x 6 | 10 x 4.0 | 10.0 x 13.00 x 32 | 10.0 | 3.3 |
| 38 - 44 | 12 x 8 | 12 x 6 | 12 x 4.0 | | | |
| 44 - 50 | 14 x 9 | 14 x 6 | 14 x 4.5 | | | |
| 50 - 58 | 16 x 10 | 16 x 7 | 16 x 5.0 | | | |
| 58 - 65 | 18 x 11 | 18 x 7 | 18 x 5.0 | | | |
| 65 - 75 | 20 x 12 | 20 x 8 | 20 x 6.0 | | | |
| 75 - 85 | 22 x 14 | 25 x 9 | 22 x 7.0 | | | |
| 85 - 95 | 25 x 14 | 25 x 9 | 25 x 7.0 | | | |
| 95 - 110 | 28 x 16 | 28 x 10 | 28 x 7.5 | | | |
| 110 - 130 | 32 x 18 | 32 x 11 | 32 x 8.5 | | | |
| 130 - 150 | 36 x 20 | 36 x 12 | 36 x 9.0 | | | |

ที่มา : วรวิทย์ และ ชาญ (2541)

ตารางผนวกที่ ก2 ตารางแนวทางในการเลือกอายุการใช้งานรถบรรทุกปี

| ชนิดของเครื่องกล | อายุเป็นชั่วโมงทำงาน |
|--|----------------------|
| เครื่องมือวัดและเครื่องมือที่ใช้ไม่บ่อยนักตัวอย่างเช่น เครื่องมือสำหรับห้องทดลอง อุปกรณ์สำหรับประตูลื่น | 500 |
| เครื่องยนต์เครื่องบิน | 500-2000 |
| เครื่องจักรสำหรับใช้งานช่วงเวลาสั้น ๆ หรือทำงานเป็นพัก ๆ ตัวอย่างเช่น เครื่องมือต่าง ๆ รอกยกของในโรงงาน เครื่องจักรที่ทำงานโดยใช้มือจับ | 4000-8000 |
| เครื่องจักรสำหรับใช้งานเป็นพัก ๆ แต่มีความสำคัญต่องานที่ทำมาก ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรสำรองของโรงงานต้นกำลัง อุปกรณ์ลำเลียงในสายงานผลิต ลิฟต์ บันจันยกสินค้าทั่วไป เครื่องมือกลที่ใช้ไม่บ่อยนัก | 8000-12000 |
| เครื่องจักรที่ใช้งาน 8 ชั่วโมง แต่ไม่ได้ทำงานเต็มที่ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดเฟืองทดสำหรับงานทั่วไป | 12000-20000 |
| เครื่องจักรใช้งาน 8 ชั่วโมง แต่ไม่ได้ทำงานเต็มที่ ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรมทั่วไป บันจันที่ใช้ยกของตลอดเวลา เครื่องเป่าลม เพลาส่งกำลัง | 20000-30000 |
| เครื่องจักรที่ใช้งานต่อเนื่อง (ทำงาน 24 ชั่วโมง) ตัวอย่างเช่น เครื่องแยกของ เครื่องอัดอากาศ บั้ม เปลา ส่งกำลัง ลูกกลิ้งของสายพานลำเลียง รอกในเหมืองแร่ มอเตอร์ไฟฟ้า | 40000-60000 |
| เครื่องจักรที่ใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง แต่ละการทำงานมีความสำคัญมาก ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ โรงไฟฟ้า บั้มในเหมืองแร่ สถานีส่งน้ำประปา เครื่องจักรในเรือเดินสมุทร | 100000-200000 |

ที่มา : วรวิทย์ และ ชาญ (2541)

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าตัวประกอบ X และ Y ของตลับลูกปืน

| F_a/C_0 | e | $F_a/F_r \leq e$ | | $F_a/F_r \geq e$ | |
|-----------|------|------------------|---|------------------|------|
| | | X | Y | X | Y |
| 0.025 | 0.22 | 1 | 0 | 0.56 | 2.00 |
| 0.04 | 0.24 | 1 | 0 | 0.56 | 1.80 |
| 0.07 | 0.27 | 1 | 0 | 0.56 | 1.60 |
| 0.13 | 0.31 | 1 | 0 | 0.56 | 1.40 |
| 0.25 | 0.37 | 1 | 0 | 0.56 | 1.20 |
| 0.50 | 0.44 | 1 | 0 | 0.56 | 1.00 |

ที่มา : คู่มือตลับลูกปืน บริษัท เอส เค เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าแนะนำสำหรับค่าความปลอดภัยของแรงสถิต, s_0

| Type of operation | Rotating bearing | | | | | | Non-rotating bearing | |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|----------------------|----------------|
| | Requirements regarding quiet running | | | | | | | |
| | Unimportant | | Normal | | High | | | |
| | Ball bearing | Roller bearing | Ball bearing | Roller bearing | Ball bearing | Roller bearing | Ball bearing | Roller bearing |
| แรงเรียบไม่มีการ สั่นสะเทือน | 0.5 | 1 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 0.4 | 0.8 |
| ปกติ | 0.5 | 1 | 1 | 1.5 | 2 | 3.5 | 0.5 | 1 |
| แรงกระแทกอย่าง หนัก | ≥ 1.5 | ≥ 2.5 | ≥ 1.5 | ≥ 3 | ≥ 2 | ≥ 4 | ≥ 1 | ≥ 2 |

ที่มา : คู่มือตลับลูกปืน บริษัท เอส เค เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางผนวกที่ ก5 โഴ้โรลเลอร์ตามมาตรฐาน ISO/R 606-1976(E) ขนาดเป็น mm
(ใช้ร่วมกับภาพผนวกที่ ข8)

| โซ้ | Pitch | d_1 | b_2 | d_2 | b_3 | แรงแตกหัก (kN) | | |
|-----|--------|-------|-------|-------|--------|----------------|---------|---------|
| | | | | | | หนึ่งชั้น | สองชั้น | สามชั้น |
| ISO | P | max | min | max | min | | | |
| 05B | 8.00 | 5.00 | 3.00 | 2.31 | 4.90 | 4.51 | 7.85 | 11.18 |
| 06B | 9.525 | 6.35 | 5.72 | 3.28 | 8.66 | 8.93 | 16.97 | 24.92 |
| 08A | 12.70 | 7.95 | 7.95 | 3.96 | 11.31 | 13.83 | 27.66 | 41.50 |
| 08B | 12.70 | 8.51 | 7.75 | 4.45 | 11.43 | 17.85 | 31.20 | 44.54 |
| 10A | 15.875 | 10.16 | 9.53 | 5.08 | 13.97 | 21.78 | 43.56 | 65.33 |
| 10B | 15.875 | 10.16 | 9.65 | 5.08 | 13.41 | 22.27 | 44.54 | 66.81 |
| 12A | 19.05 | 11.91 | 12.7 | 5.94 | 17.88 | 31.20 | 62.39 | 93.59 |
| 12B | 19.05 | 12.07 | 11.68 | 5.72 | 15.75 | 28.94 | 57.88 | 86.82 |
| 16A | 25.40 | 15.88 | 15.88 | 7.92 | 22.74 | 55.62 | 111.26 | 166.87 |
| 16B | 25.40 | 15.88 | 17.02 | 8.28 | 25.58 | 42.28 | 84.56 | 126.84 |
| 20A | 31.75 | 19.05 | 19.05 | 9.53 | 27.59 | 86.82 | 173.64 | 260.46 |
| 20B | 31.75 | 19.05 | 19.56 | 10.19 | 29.14 | 64.55 | 129.10 | 193.65 |
| 24A | 38.10 | 22.23 | 25.40 | 11.10 | 35.59 | 124.59 | 249.17 | 373.76 |
| 24B | 38.10 | 25.40 | 25.40 | 14.63 | 38.05 | 97.70 | 195.81 | 293.71 |
| 28A | 44.45 | 25.40 | 25.40 | 12.70 | 37.32 | 169.12 | 388.25 | 507.37 |
| 28B | 44.45 | 27.94 | 30.99 | 15.90 | 46.71 | 129.10 | 258.20 | 387.30 |
| 32A | 50.80 | 28.58 | 31.75 | 14.27 | 45.34 | 222.49 | 444.98 | 667.47 |
| 32B | 50.80 | 29.21 | 30.99 | 17.81 | 45.70 | 169.12 | 338.25 | 507.37 |
| 40A | 63.50 | 39.68 | 38.10 | 19.84 | 55.02 | 347.08 | 694.16 | 1041.23 |
| 40B | 63.50 | 39.37 | 38.10 | 22.89 | 55.88 | 262.61 | 525.23 | 787.84 |
| 48A | 76.20 | 47.63 | 47.63 | 23.80 | 67.95 | 500.60 | 1001.21 | 1501.81 |
| 48B | 76.20 | 48.26 | 45.72 | 29.24 | 70.69 | 400.54 | 800.99 | 1201.43 |
| 56B | 88.90 | 53.98 | 53.34 | 34.32 | 81.46 | 542.89 | 1085.77 | - |
| 64B | 101.6 | 63.5 | 60.96 | 39.40 | 92.15 | 712.01 | 1423.92 | - |
| 72B | 114.3 | 72.39 | 68.58 | 44.48 | 103.94 | 898.89 | 1797.78 | - |

ที่มา : วริทธิ และ ชาญ (2541)

ตารางผนวกที่ ก6 มวลของโซ่โรลเลอร์ต่อความยาว

| โซ่ ISO | มวลโซ่, kg/m | | | โซ่ ISO | มวลโซ่, kg/m | | | |
|---------|--------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|
| | หนึ่งชั้น | สองชั้น | สามชั้น | | หนึ่งชั้น | สองชั้น | สามชั้น | สี่ชั้น |
| 06B | 0.39 | 0.74 | 1.10 | 06A | 0.33 | 0.65 | 0.98 | |
| 08B | 0.68 | 1.34 | 1.99 | 08A | 0.61 | 1.22 | 1.83 | 2.44 |
| 10B | 0.85 | 1.70 | 2.55 | 10A | 0.98 | 1.96 | 2.95 | 3.93 |
| 12B | 1.16 | 2.31 | 3.45 | 12A | 1.59 | 3.05 | 4.54 | 6.10 |
| 16B | 2.71 | 5.42 | 8.13 | 16A | 2.50 | 5.00 | 7.50 | 10.00 |
| 20B | 3.70 | 7.40 | 11.10 | 20A | 3.68 | 7.35 | 11.03 | 14.70 |
| 24B | 6.70 | 13.75 | 20.75 | 24A | 5.54 | 11.07 | 16.61 | 22.14 |
| 28B | 8.25 | 16.80 | 25.40 | 28A | 7.52 | 15.00 | 22.60 | 30.10 |
| 32B | 9.22 | 18.45 | 27.67 | 32A | 9.67 | 19.34 | 29.02 | 38.69 |
| 40B | 15.58 | 31.55 | 47.62 | 40A | 15.48 | 30.95 | 46.43 | 61.90 |
| 48B | 24.71 | 50.00 | 75.45 | 48A | | | | |
| 56B | 33.20 | 67.60 | | 56A | | | | |
| 64B | 44.64 | 89.29 | | 64A | | | | |
| 72B | 59.50 | | | 72A | | | | |

ที่มา : วริทธิ และ ชาญ (2541)

ตารางผนวกที่ ก7 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำสม่ำเสมอ

| โซโรลเลอร์แบบ B | | | | โซโรลเลอร์แบบ A | | | |
|----------------------------|------------|-----------------------|---------------|----------------------------|-------------|--------------|---------------|
| จำนวน พื้นบน พีเนียน | อุปกรณ์ขับ | | | จำนวน พื้นบนพี เนียน | อุปกรณ์ขับ | | |
| | สม่ำเสมอ | กระตุก ปาน กลาง | กระตุก มาก | | ประเภท I | ประเภท II | ประเภท III |
| ใช้กับภาพผนวก ข9 | | | | ใช้กับภาพผนวก ข10 | | | |
| 11 | 1.72 | 2.16 | 2.59 | 11 | 1.41 | 1.41 | 1.69 |
| 12 | 1.59 | 1.98 | 2.38 | 12 | 1.28 | 1.28 | 1.54 |
| 13 | 1.47 | 1.84 | 2.21 | 13 | 1.19 | 1.19 | 1.43 |
| 14 | 1.35 | 1.69 | 2.03 | 14 | 1.10 | 1.10 | 1.32 |
| 15 | 1.27 | 1.58 | 1.90 | 15 | 1.00 | 1.00 | 1.20 |
| 16 | 1.19 | 1.49 | 1.79 | 16 | 0.93 | 0.93 | 1.11 |
| 17 | 1.12 | 1.40 | 1.69 | 17 | 0.86 | 0.86 | 1.03 |
| 18 | 1.05 | 1.32 | 1.58 | 18 | 0.81 | 0.81 | 0.98 |
| 19 | 1.00 | 1.25 | 1.50 | ใช้กับภาพผนวก ข11 | | | |
| 20 | 0.95 | 1.19 | 1.43 | 19 | 1.00 | 1.00 | 1.20 |
| 21 | 0.91 | 1.14 | 1.36 | 20 | 0.93 | 0.93 | 1.12 |
| 22 | 0.86 | 1.08 | 1.29 | 21 | 0.88 | 0.88 | 1.06 |
| 23 | 0.83 | 1.03 | 1.24 | 22 | 0.84 | 0.84 | 1.01 |
| 24 | 0.79 | 0.99 | 1.19 | 23 | 0.80 | 0.80 | 0.96 |
| 25 | 0.76 | 0.95 | 1.14 | 24 | 0.75 | 0.78 | 0.93 |
| | | | | 25 | 0.75 | 0.75 | 0.90 |

สม่ำเสมอ : มอเตอร์ไฟฟ้า

ประเภท I : เครื่องยนต์ต่อผ่านไฮดรอลิกคัปปลิง

กระตุกปานกลาง : เครื่องยนต์หลายสูบ

ประเภท II : มอเตอร์ไฟฟ้าหรือกังหัน

กระตุกมาก : เครื่องยนต์หนึ่งสูบ

ประเภท III : เครื่องยนต์ต่อผ่านอุปกรณ์ทางกล

ที่มา : วริทธิ และ ชาญ (2541)

ตารางผนวกที่ ๘ ขนาดระบุของเพลามาตรฐานตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969 (ขนาดเป็น mm)

| ขนาดเพลามาตรฐาน ISO/R 775-1969 (mm) | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 18 |
| 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 |
| 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 |
| 180 | 190 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 |
| 320 | 340 | 360 | 380 | | | | |

ที่มา : วริทธิ์ และ ชาญ (2545)

ตารางผนวกที่ ๙ ค่าตัวประกอบความล้าของเพล

| ชนิดของแรง | C_m | C_t |
|-------------------------------|---------|---------|
| เพลายู่นึ่ง | | |
| แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ | 1.0 | 1.0 |
| แรงกระตุก | 1.5-2.0 | 1.5-2.0 |
| เพลาม้วน | | |
| แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้า ๆ | 1.5 | 1.0 |
| แรงกระตุกอย่างเบา | 1.5-2.0 | 1.0-1.5 |
| แรงกระตุกอย่างแรง | 2.0-3.0 | 1.5-3.0 |

ที่มา : วริทธิ์ และ ชาญ (2545)

ตารางผนวกที่ ก10 เงื่อนไขการจับยึดแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

| ชนิดการจับยึด | คำอธิบายเงื่อนไขข้อกำหนด |
|---|---|
| Fixed (การจับยึดแน่น) | จับยึดแน่นหรือรองรับแบบแข็งเกร็ง ซึ่งจะมีตัวแปรที่ถูกบังคับครบทั้ง 6 ตัวแปรและเงื่อนไขจะไม่เปิดให้ผู้ออกแบบป้อนระยะเคลื่อนตัวหรือทิศทางเคลื่อนตัว |
| Immovable (No translations) (ระยะไม่เคลื่อน) | ตัวแปรจะถูกบังคับ 3 ตัวแปร เฉพาะตัวแปรระยะเคลื่อนตัว ถ้าเลือกใช้เอลิเมนต์ทรงตัน การเลือกชนิดการจับยึดแบบ Fixed และ Immovable จะได้ผลเฉลยเหมือนกัน (จะมีเฉพาะตัวแปรเคลื่อนตัวที่ถูกบังคับ) |
| Symmetry (สมมาตร) | ความสมมาตรสามารถกำหนดได้ที่พื้นผิวเรียบที่เป็นระนาบแบ่งครึ่งชิ้นงาน (ระนาบสมมาตร) ตัวแปรจะถูกบังคับระยะเคลื่อนตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่สมมาตร |
| Roller/Sliding (ผิวกลิ้ง/ผิวไถล) | ตัวเลือกกลิ้ง/ผิวไถลจะกำหนดคบนระนาบหรือพื้นผิวโดยตัวแปรบังคับไม่ให้มีระยะเคลื่อนตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิว |
| Hinge (บานพับ) | เป็นตัวเลือกที่ใช้กับพื้นผิวทรงกระบอก เน้นการเคลื่อนที่รอบแกน โดยหลังจากรับภาระ แกนอ้างอิงจะไม่เคลื่อนตัว (ถูกบังคับ) |
| Use reference geometry (อ้างอิงรูปทรง) | เป็นตัวเลือกที่ใช้พื้นผิว ขอบ หรือมุมแหลม เพื่ออ้างอิงในการกำหนดตัวแปรบังคับ โดยโปรแกรมจะเปิดโอกาสให้ผู้ออกแบบปรับตั้งค่าการบังคับทิศทางและการอ้างอิงระนาบตามความต้องการของผู้ออกแบบ |
| On flat face (พื้นผิวเรียบ) | ตัวเลือกนี้เปิดโอกาสให้กำหนดทิศทางเคลื่อนตัวทั้งสามทิศทางหลัก เพื่อกำหนดบังคับระยะเคลื่อนตัวบนพื้นผิวเรียบ |
| On cylindrical face (พื้นผิวทรงกระบอก) | กำหนดตัวบังคับสามทิศทางหลัก โดยการอ้างอิงระบบพิกัดทรงกระบอก (รัศมี , มุมกวาด , ระยะแนวแกน) ตัวเลือกนี้จะเปิดโอกาสให้ปรับตั้งค่าตัวแปรมากกว่าตัวเลือกบานพับ (Hinge) |
| On spherical face (พื้นผิวทรงกลม) | กำหนดตัวบังคับการเคลื่อนที่ตัวอ้างอิงระบบพิกัดทรงกลม (รัศมี, มุมกวาดระนาบนอน, มุมกวาดระนาบแนวตั้ง) |

ที่มา : ศุภชัย และ สถาพร (2549)

ตารางผนวกที่ ก11 ชนิดของแรงกระทำที่กำหนดในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

| ชนิดของแรงกระทำ | คำอธิบาย |
|--------------------------------|--|
| แรงกระทำ/โมเมนต์ | ตัวเลือกในการนำไปใช้งานจะมีทั้งแรงกระทำและโมเมนต์ที่กระทำลงบนพื้นผิว (face) กระทำที่ขอบ (edge) หรือกระทำที่มุมแหลม ซึ่งสามารถกำหนดทิศทางด้วยการอ้างอิงที่ระนาบ, ขอบ, พื้นผิวและทิศทางแกน สำหรับโมเมนต์ที่กระทำจะใช้เฉพาะ shell elements (เอลิเมนต์แผ่นบาง) ซึ่งจะมี 6 ระดับชั้นความเสริต่อ โหนด ประกอบด้วย 3 รูปแบบแกนหมุน ส่วน solid elements (เอลิเมนต์ทรงตัน) จะมี 3 ระดับชั้นความเสริเฉพาะตัวแปรการเสิริรูปเท่านั้น แต่ถ้าผู้ออกแบบต้องการประยุกต์ให้มีโมเมนต์ลงบนเอลิเมนต์ทรงตันจะใช้วิธีการกระจายแรงไปยังตำแหน่งอื่น แล้วส่งผลให้ตำแหน่งของแรงกระทำได้รับทั้งแรงและโมเมนต์ที่ต้องการ |
| แรงกระทำตั้งฉาก (Normal force) | เป็นการกำหนดแรงกระทำให้มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ที่ถูกเลือก |
| แรงบิด (Torque) | กรณีทรงกระบอกจะเหมาะสมกับการประยุกต์แรงบิดมาก โดยจะกำหนดทิศทางของ แรงบิดเป็นไปตามกฎมือขวา |

ที่มา : ศุภชัย และ สถาพร (2549)

ตารางผนวกที่ ก12 ราคาประเมินของเครื่องฟนสีไข่เชื่อม

| รายการ | ชื่ออุปกรณ์ | ราคาต่อหน่วย | จำนวน | ราคารวม (บาท) |
|--------|--------------------------|--------------|-------|---------------|
| 1 | มอเตอร์ไฟฟ้า | 10,000 | 1 | 10,000 |
| 2 | พัดลม | 2,500 | 6 | 15,000 |
| 3 | หัวสเปรย์ | 7,000 | 3 | 21,000 |
| 4 | สลักเกลียวและแป้นเกลียว | 6,000 | 1 | 6,000 |
| 5 | อุปกรณ์ลม | 40,000 | 1 | 40,000 |
| 6 | อุปกรณ์ทางกลสำเร็จรูป | 70,000 | 1 | 70,000 |
| 7 | Roller | 200 | 300 | 60,000 |
| 8 | ชิ้นงานตัดพับเชื่อม | 30,000 | 1 | 30,000 |
| 9 | ชิ้นงานกลึง | 30,000 | 1 | 30,000 |
| 10 | ชิ้นงานกัด | 60,000 | 1 | 60,000 |
| 11 | ค่าชุบชิ้นงาน | 4,000 | 1 | 4,000 |
| 12 | ค่าอุปกรณ์ Control | 20,000 | 1 | 20,000 |
| 13 | ค่าจ้างทำอุปกรณ์ Control | 20,000 | 1 | 20,000 |
| | | | รวม | 386,000 |

หมายเหตุ : ราคาประเมินไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายในการเดินทาง



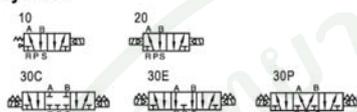
Solenoid valve(5/2 , 5/3 way)



4V100 Series



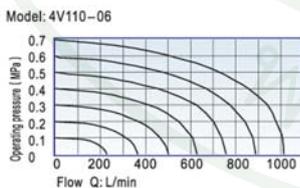
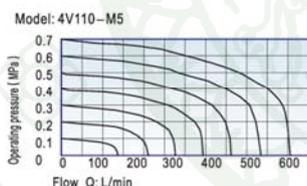
Symbol



Product feature

1. Pilot-oriented mode: optional for internal or external.
2. Structure in sliding column mode: good tightness and sensitive reaction.
3. Three position solenoid valves have three kinds of central function for your choice.
4. Double control solenoid valves have memory function.
5. Internal hole adopts special processing technology which has little attrition friction, low start pressure and long service life.
6. No need to add oil for lubrication.
7. It is available to form integrated valve group with the base to save installation space.
8. Affiliated manual devices are equipped to facilitate installation and debugging.
9. Several standard voltage grades are optional.

Flow chart



Specification

| Model | 4V110-M5 4V120-M5 | 4V130C-M5 4V130E-M5 4V130P-M5 | 4V110-06 4V120-06 | 4V130C-06 4V130E-06 4V130P-06 |
|--------------------|---|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Fluid | Air(to be filtered by 40 μm filter element) | | | |
| Acting | Piloted | | | |
| Port size ① | In=Out=M5 | | In=Out=1/8" | |
| Orifice size | 5.5mm ² (Cv=0.31) | 5.0mm ² (Cv=0.28) | 12.0mm ² (Cv=0.67) | 9.0mm ² (Cv=0.50) |
| Valve type | 5 port 3 position | 5 port 2 position | 5 port 3 position | 5 port 2 position |
| Operating pressure | 0.15~0.8MPa(21~114psi) | | | |
| Proof pressure | 1.5MPa(215psi) | | | |
| Temperature °C | -20~70 | | | |
| Material of body | Aluminum alloy | | | |
| Lubrication ② | Not required | | | |
| Max. frequency ③ | 5 cycle/sec | 3 cycle/sec | 5 cycle/sec | 3 cycle/sec |
| Weight | 4V110-M5:120g 4V120-M5:175g | 200g | 4V110-06:120g 4V120-06:175g | 200g |

- ① PT thread, NPT thread and G thread are available.
- ② Once lubricated air is used, continue with same medium to optimise valve life span. Lubricants like ISO VG32 or equivalent are recommended.
- ③ The maximum actuation frequency is in the no-load state.

Coil specification

| Item | Specification |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Standard voltage | AC220V, AC110V, AC24V, DC24V, DC12V |
| Scope of voltage | AC: ± 15% DC: ± 10% |
| Power consumption | AC:2.5VA DC:2.5W |
| Protection | IP65(DIN40050) |
| Temperature classification | B Class |
| Electrical entry | Terminal, Grommet |
| Activating time | 0.05 sec and below |

Ordering code

4V 1 10 06 A □ P

- Model**: 4V: Solenoid valve(5/2, 5/3 way)
- Code**: 1: 100 Series
- Valve type**:
 - 10: Single solenoid 5/2 way
 - 20: Double solenoid 5/2 way
 - 30C: Double solenoid 5/3 way closed center
 - 30E: Double solenoid 5/3 way exhaust center
 - 30P: Double solenoid 5/3 way pressure center
- Port size**:
 - M5: M6
 - 06: 1/8"
- Thread type**:
 - Port size
 - Thread type
 - 1/8": P: PT, T: NPT, G: G, M5: Not this code
- Electrical entry**:
 - Blank: Terminal
 - I: Grommet
- Voltage**:
 - A: AC220V
 - B: DC24V
 - C: AC110V
 - E: AC24V
 - F: DC12V

Please refer to 37 for manifold specification and the order way.

ภาพผนวกที่ ข1 คุณสมบัติของ โซลินอยด์วาล์ว 5/2 และ 5/3 ทาง

ที่มา : Airtac Enterprise Company Limited (2008)

Solenoid valve(3/2 way)



3V100 Series



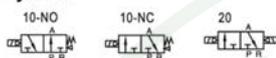
Specification

| Model | 3V110-M5 | 3V120-M5 | 3V110-06 | 3V120-06 |
|--------------------|--|----------|-------------------------------|----------|
| Fluid | Air(to be filtered by 40 μ m filter element) | | | |
| Acting | Piloted | | | |
| Port size ① | M5 | | 1/8" | |
| Orifice size | 5.5mm ² (Cv=0.31) | | 12.0mm ² (Cv=0.67) | |
| Valve type | 3 port 2 position | | | |
| Lubrication ② | Not required | | | |
| Operating pressure | 0.15~0.8MPa(21~114psi) | | | |
| Proof pressure | 1.5MPa(215psi) | | | |
| Temperature °C | -20~70 | | | |
| Material of body | Aluminum alloy | | | |

① PT thread, NPT thread and G thread are available.

② Once lubricated air is used, continue with same medium to optimise valve life span. Lubricants like ISO VG32 or equivalent are recommended.

Symbol

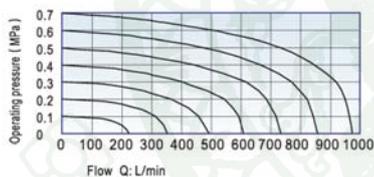


Product feature

1. Pilot-oriented mode: internally pilot.
2. Structure in sliding column mode: good tightness and sensitive reaction.
3. Double control solenoid valves have memory function.
4. Internal hole adopts special processing technology which has little attrition friction, low start pressure and long service life.
5. No need to add oil for lubrication.
6. Affiliated manual devices are equipped to facilitate installation and debugging.
7. Several standard voltage grades are optional.
8. Integrate with the manifold to save installation space.

Flow chart

Model: 3V110-06-NO



Coil specification

| Item | Specification |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Standard voltage | AC220V, AC110V, AC24V, DC24V, DC12V |
| Scope of voltage | AC: ± 15% DC: ± 10% |
| Power consumption | AC: 2.5VA DC: 2.5W |
| Protection | IP65(DIN40050) |
| Temperature classification | B Class |
| Electrical entry | Terminal, Grommet |
| Activating time | 0.05 sec and below |
| Max. frequency ① | 5 cycle/sec |

① The maximum actuation frequency is in the no-load state.

Ordering code

3V 1 10 06 NO A P

- Model**: 3V: Solenoid valve(3/2 way)
- Code**: 1: 100 Series
- Valve type**: 10: Single solenoid, 20: Double solenoid
- Port size**: M5: M6, 06: 1/8"
- Acting type**:

| Valve type | Acting type |
|------------|--|
| 10 | NC: Normally closed, NO: Normally opened |
| 20 | Not code |
- Thread type**:

| Port size | Thread type |
|-----------|---------------------|
| 1/8" | P: PT, T: NPT, G: G |
| M5 | Not this code |
- Electrical entry**: Blank: Terminal, I: Grommet
- Voltage**: A: AC220V, B: DC24V, C: AC110V, E: AC24V, F: DC12V

Please refer to 36 for manifold specification and the order way.

ภาพผนวกที่ ๒ คุณสมบัติของโซลินอยด์วาล์ว 3/2 ทาง

ที่มา : Airtac Enterprise Company Limited (2008)

Mini cylinder(Stainless steel, ISO6432)



MI Series

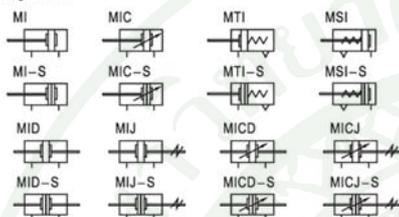


Specification

| Bore size(mm) | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 |
|--------------------|--|----|----|----|----|----|------|------|
| Acting type | Double acting, Single acting, push, Single acting, pull | | | | | | | |
| Fluid | Air(to be filtered by 40 μ m filter element) | | | | | | | |
| Operating pressure | Double acting: 0.1~1.0MPa(15~145psi)(1.0~10.0bar) Single acting: 0.2~1.0MPa(28~145psi)(2.0~10.0bar) | | | | | | | |
| Proof pressure | 1.5MPa(215psi)(15bar) | | | | | | | |
| Temperature °C | -20~70 | | | | | | | |
| Speed range mm/s | Double acting: 30~800 Single acting: 50~800 | | | | | | | |
| Stroke tolerance | 0 - 150 ^{+1.0} >150 ^{+1.4} | | | | | | | |
| Cushion type | MIC Series: Variable cushion Other series: Bumper | | | | | | | |
| Port size (1) | M5 x 0.8 | | | | | | 1/8" | 1/4" |

① G thread is available. Add) Refer to P403-426 for detail of sensor switch.

Symbol



Stroke

| Bore size (mm) | Standard stroke (mm) | | | | | | | | | | | | | Max. std stroke | Max. stroke | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | | | 150 | | | | | |
| Double acting | - | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 150 | 200 | | | | | |
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 200 | 200 | | | |
| | 12 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 250 | 500 | |
| | 16 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 300 | 300 | 500 |
| | 20 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 300 | 500 | 700 |
| Double acting with cushion | 25 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 300 | 600 | 700 |
| | 32 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 600 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | |
| | 40 | 600 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | |
| | Single acting, pull | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | |
| | | 10 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | |
| 12 | | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | |
| 16 | | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | | |
| 20 | | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | -- | -- | -- | -- | -- | | |
| Single acting, push | 25 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | -- | -- | -- | -- | -- | | |
| | 32 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | -- | -- | -- | -- | -- | | |
| | 40 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 | 150 | -- | -- | -- | -- | -- | | |

Note) Consult us for non-standard stroke.

Product feature

1. In accordance with ISO6432 standard(Φ8-Φ25).
2. Front and back cover owns fixed bumper pad which can reduce the impact of direction-change of the cylinder.
3. There are several mode of back cover, which makes the installation of cylinder more convenient.
4. Front and back cover and stainless steel block adopt riveted rolling packed structure to form a reliable connection.
5. Piston rod and cylinder body with the material of stainless steel make the cylinder adapt general working environment with corrosivity.
6. There are cylinders and accessories with several specifications for installation for your choice.

ภาพผนวกที่ ๓3 คุณสมบัติของกระบอกลมรุ่น MI

ที่มา : Airtac Enterprise Company Limited (2008)

Mini cylinder(Aluminum barrel)



MAL Series

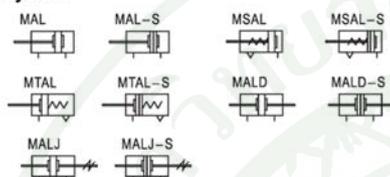


Specification

| Bore size(mm) | 20 | 25 | 32 | 40 |
|--------------------|---|------------------------------------|------|----|
| Acting type | MSAL, MTAL | Single acting | | |
| | Others | Double acting | | |
| Fluid | Air(to be filtered by 40 μm filter element) | | | |
| Operating pressure | Double acting | 0.1~1.0MPa(15~145psi)(1.0~10.0bar) | | |
| | Single acting | 0.2~1.0MPa(28~145psi)(2.0~10.0bar) | | |
| Proof pressure | 1.5MPa(215psi)(15bar) | | | |
| Temperature °C | -20~70 | | | |
| Speed range mm/s | Double acting: 30~800 Single acting: 50~800 | | | |
| Stroke tolerance | 0~150 ^{+0.05} >150 ^{+0.1} | | | |
| Cushion type | Bumper | | | |
| Port size (1) | 1/8" | | 1/4" | |

(1) PT thread, NPT thread and G thread are available. Add) Refer to P403-426 for detail of sensor switch.

Symbol



Product feature

1. Manufactured by our enterprise.
2. Front and back cover and cylinder tube are connected by threads.
3. Piston adopts heterogeneous two-way seal structure. It has compact size and has the function of grease reservation.
4. Front cover adopts self-lubrication bearing guide that has good performance of lubrication and guide.
5. There are several modes of back cover, which makes the installation of cylinder more convenient.
6. There are cylinders and mounting accessories with several specifications for your choice.

Stroke

| Bore size (mm) | Standard stroke (mm) | | | | | | | | | | Max. std stroke | Max. stroke | | | | |
|----------------|----------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-------------|-----|-----|------|------|
| | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | | | | | | |
| MAL | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 500 | 800 | 1200 |
| | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 800 |
| | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 1200 | 1500 |
| MSAL | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | - | - | - | - | 150 | - | - |
| | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | - | - | - | - | - | 150 | - | - |
| | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | - | - | - | - | - | - | 150 | - | - |
| | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | - | - | - | - | - | - | - | 150 | - | - |
| MTAL | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | - | - | - | - | - | - | 100 | - | - |
| | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | - | - | - | - | - | - | - | 100 | - | - |
| | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | - | - |
| | 40 | 50 | 75 | 100 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 100 | - | - |
| MALD | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 300 | 300 | 300 |
| | 25 | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 250 | 250 | 300 | 300 |
| | 32 | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 250 | 250 | 250 | 300 | 300 |
| | 40 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 160 | 175 | 200 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 300 | 300 |

Note) Consult us for non-standard stroke.

ภาพผนวกที่ ๔ คุณสมบัติของของกระบอกลมรุ่น MAL

ที่มา : Airtac Enterprise Company Limited (2008)

| Top Plate Material | Guide Rail Material | Friction Coefficient | |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------|------------|
| | | Unlubricated | Lubricated |
| Stainless Steel or Steel | Stainless Steel or Steel | 0.35 | 0.2 |
| Stainless Steel or Steel | UHMW | 0.25 | 0.15 |
| Engineered Plastic | Stainless Steel or Steel | 0.25 | 0.15 |
| Engineered Plastic | UHMW | 0.25 | 0.12 |
| Engineered Plastic (Low Friction) | Stainless Steel or Steel | 0.17 | 0.12 |
| Engineered Plastic (Low Friction) | UHMW | 0.18 | 0.12 |

ภาพผนวกที่ ๕ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโซ่กับสายพาน

ที่มา : Tsubakimoto Company Limited (1995)

Compact AC Geared Motors / Gear Heads

— Motors with Electromagnetic Brake —



■ Gear Heads
PACMGX (For Motor 40W or Less)
PACMGZ (For Motor 60W or More)

A60
Shaft Part Details

Without Key

A70, 80
Shaft Part Details

Key

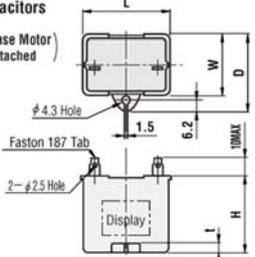
A90 (40W)
Shaft Part Details

Key

A90 (60W, 90W)
Shaft Part Details

Key

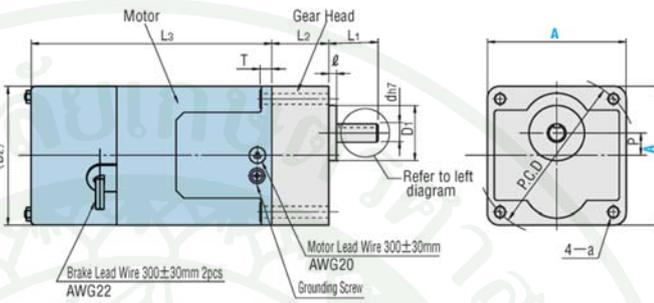
■ Capacitors
(1-Phase Motor) Attached



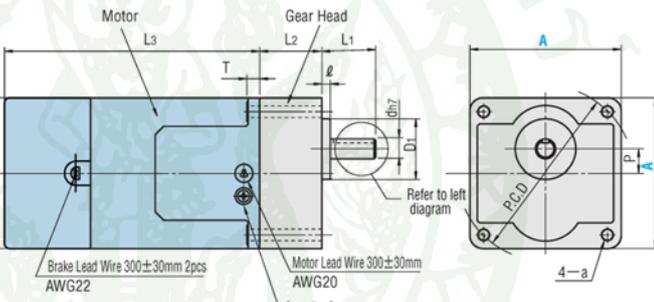
■ Electromagnetic Brake Motors
PACMB (1-Phase) **PACMTB** (3-Phase)

| | |
|------------------|---|
| Motors | Capacitor (Not for 3-Phase Motor) |
| Gear Head | Key (Not for A60) Screw, Nut, Washer (4 Pcs. for each) |

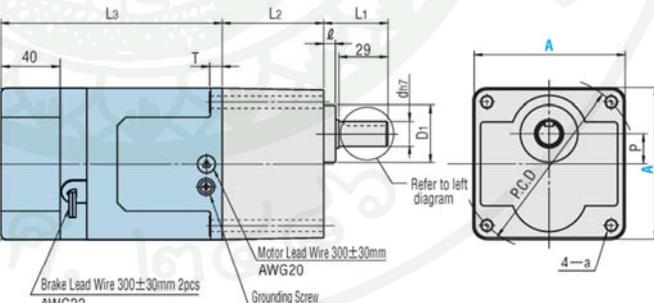
●5W or Less ※Motor Lead Wire : 3 pcs Brake Lead Wire : 2 pcs



●25W, 40W



●60W or More



Lubricating Method of Gear Head : Greasing

☞ Refer to the attached user's guide for transportation, storage, installation place, installation, assembly, wiring, operation, maintenance and inspection of the motors.

ภาพผนวกที่ ๖ คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบมีเบรก

CAD Data Folder Name : Couplings

File Name <Motors> : m [] [] [] .dxd <Gear Heads> : g [] [] [] .dxd

| Motors with Electromagnetic Brake | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------------|-------------|--------------|--------------|----|-----------------|--------------|---------|-----|------|----|-----|-------|------------------------|-----------|------------|-------------|--------|
| Catalog No. | Type | Output (W) | Voltage (V) | d | D1 | L1 | L2 [®] | L3 | L | T | (Dz) | P | a | P.C.D | Mass (kg) [®] | | Unit Price | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | Motor | Gear Head | PACMB | PACMTB | |
| PACMB *PACMTB | 60 | 6 | 100 | 200 | 8 | 25 | 32 | 26 (33) | 114.5 | 6 | 7 | 65 | 10 | 4.5 | 70 | 0.85 | 0.24 (0.3) | 10,040 | — |
| | | | 200 | 0.18 | | | | 0.056 (0.07) | | | | | | | | 10,240 | — | | |
| | | 70 | 15 | 100 | 200 | 10 | 30 | 36 | 30 (36) | 119 | 5 | 7 | 74 | 15 | 5.5 | 82 | 1.1 | 0.38 (0.45) | 10,530 |
| | 200 | | | 0.18 | 0.056 (0.07) | | | | 10,720 | | | | | | | | — | | |
| | 80 | | 25 | 100 | 200 | 12 | 36 | 37 | 30 | 128 | 6 | 7 | 86 | 15 | 5.5 | 94 | 1.8 | 0.6 | 11,810 |
| | | 200 | | 0.19 | 0.056 (0.07) | | | | 12,070 | | | | | | | | 12,070 | | |
| | | 90 | 40 | 100 | 200 | 15 | 34 | 38 | 37 | 151 | 5 | 7 | 92 | 18 | 6.5 | 104 | 2.8 | 0.8 | 14,880 |
| | 200 | | | 0.2 | 0.056 (0.07) | | | | 15,150 | | | | | | | | 15,150 | | |
| | 60 | | 100 | 200 | 15 | 34 | 38 | 60 | 168.5 | 7 | 7.5 | 92 | 18 | 6.5 | 104 | 3.1 | 1.4 | 16,870 | — |
| | | 200 | 0.2 | 0.056 (0.07) | | | | | | | | | | | | 17,250 | 17,250 | | |
| | 90 | 100 | 100 | 200 | 15 | 34 | 38 | 183.5 | 7 | 7.5 | 92 | 18 | 6.5 | 104 | 3.7 | 1.4 | 19,050 | — | |
| | | | 200 | 0.2 | | | | | | | | | | | 0.056 (0.07) | 19,420 | 19,420 | | |

* The 3-Phase Motors is available also at 220 V. * Values in () indicate dimensions and mass for gear heads with a reduction gear ratio of 30 or more.

| Motor with Electromagnetic Brake Specification (1-Phase) Rated for 30 minutes No. of Poles : 4P | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------------|-------------|-----------|-------------|--------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|------------------|--------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Catalog No. | Type | Output (W) | Voltage (V) | 50Hz | | | | 60Hz | | | | Brake Input (W) | Brake Current (A) | Brake Static Friction Torque (N·m) | Capacitance (μF) | | | | |
| | | | | Input (W) | Current (A) | Revolution Speed (r/min) | Torque (N·m) | Starting Current (A) | Starting Torque (N·m) | Input (W) | Current (A) | | | | | Revolution Speed (r/min) | Torque (N·m) | | |
| PACMB | 60 | 6 | 100 | 22 | 0.22 | 1300 | 0.044 (0.45) | 0.32 | 0.056 (0.57) | 22 | 0.22 | 1600 | 0.035 (0.36) | 0.32 | 0.056 (0.57) | 4 | 0.04 | 0.049 (0.5) | 3.5 (200V) |
| | | | 200 | 25 | 0.13 | 1300 | 0.044 (0.45) | 0.17 | 0.056 (0.57) | 25 | 0.13 | 1600 | 0.035 (0.36) | 0.18 | 0.056 (0.57) | 4 | 0.02 | 0.049 (0.5) | 0.9 (400V) |
| | | 70 | 15 | 100 | 36 | 0.36 | 1300 | 0.110 (1.10) | 0.59 | 0.10 (1.0) | 38 | 0.38 | 1600 | 0.088 (0.90) | 0.57 | 0.10 (1.0) | 4 | 0.05 | 0.078 (0.8) |
| | 200 | | | 38 | 0.18 | 1300 | 0.110 (1.10) | 0.28 | 0.10 (1.0) | 39 | 0.19 | 1600 | 0.088 (0.90) | 0.28 | 0.10 (1.0) | 4 | 0.03 | 0.078 (0.8) | 1.5 (200V) |
| | 80 | | 25 | 100 | 56 | 0.57 | 1300 | 0.19 (1.9) | 1.0 | 0.20 (2.0) | 56 | 0.56 | 1600 | 0.16 (1.6) | 1.0 | 0.20 (2.0) | 6 | 0.06 | 0.10 (1.0) |
| | | 200 | | 56 | 0.29 | 1300 | 0.19 (1.9) | 0.52 | 0.20 (2.0) | 56 | 0.28 | 1600 | 0.16 (1.6) | 0.51 | 0.20 (2.0) | 6 | 0.03 | 0.10 (1.0) | 2.4 (400V) |
| | | 90 | 40 | 100 | 79 | 0.81 | 1300 | 0.29 (3.0) | 1.7 | 0.32 (3.3) | 80 | 0.81 | 1625 | 0.24 (2.4) | 1.6 | 0.32 (3.3) | 7 | 0.09 | 0.20 (2.0) |
| | 200 | | | 79 | 0.4 | 1300 | 0.29 (3.0) | 0.85 | 0.32 (3.3) | 80 | 0.41 | 1625 | 0.24 (2.4) | 0.78 | 0.32 (3.3) | 7 | 0.05 | 0.20 (2.0) | 3.8 (400V) |
| | 60 | | 100 | 127 | 1.3 | 1.275 | 0.45 (4.6) | 2.4 | 0.57 (5.8) | 133 | 1.3 | 1600 | 0.36 (3.7) | 2.4 | 0.57 (5.8) | 7 | 0.09 | 0.39 (4.0) | 25 (200V) |
| | | 200 | | 127 | 0.65 | 1275 | 0.45 (4.6) | 1.2 | 0.57 (5.8) | 133 | 0.65 | 1600 | 0.36 (3.7) | 1.2 | 0.57 (5.8) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) | 6.2 (375V) |
| | | 90 | 100 | 171 | 1.7 | 1.225 | 0.70 (7.1) | 2.8 | 0.68 (6.9) | 181 | 1.9 | 1525 | 0.56 (5.7) | 2.7 | 0.70 (7.1) | 7 | 0.09 | 0.39 (4.0) | 30 (200V) |
| | 200 | | | 171 | 0.93 | 1225 | 0.70 (7.1) | 1.4 | 0.68 (6.9) | 181 | 0.96 | 1525 | 0.56 (5.7) | 1.04 | 0.70 (7.1) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) | 7.5 (370V) |

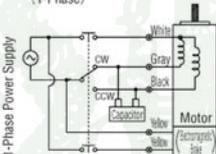
| Motor with Electromagnetic Brake Specification (3-Phase) Continuous Rating No. of Poles : 4P | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------------|-------------|-----------|-------------|--------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------|-------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------|------|------------|
| Catalog No. | Type | Output (W) | Voltage (V) | 50Hz | | | | 60Hz | | | | Brake Input (W) | Brake Current (A) | Brake Static Friction Torque (N·m) | | | | |
| | | | | Input (W) | Current (A) | Revolution Speed (r/min) | Torque (N·m) | Starting Current (A) | Starting Torque (N·m) | Input (W) | Current (A) | | | | Revolution Speed (r/min) | Torque (N·m) | | |
| PACMTB | 80 | 25 | 200 | 50 | 0.25 | 1350 | 0.18 (1.8) | 0.62 | 0.54 (5.5) | 47 | 0.22 | 1625 | 0.15 (1.5) | 0.58 | 0.40 (4.0) | 6 | 0.03 | 0.10 (1.0) |
| | | | 220 | 54 | 0.27 | 1375 | 0.18 (1.8) | 0.67 | 0.66 (6.7) | 49 | 0.23 | 1650 | 0.15 (1.5) | 0.64 | 0.50 (5.1) | 6 | 0.03 | 0.10 (1.0) |
| | | 90 | 40 | 200 | 69 | 0.31 | 1350 | 0.28 (2.9) | 0.90 | 0.72 (7.3) | 68 | 0.29 | 1625 | 0.24 (2.4) | 0.82 | 0.51 (5.2) | 7 | 0.05 |
| | 220 | | | 70 | 0.32 | 1375 | 0.27 (2.8) | 1.00 | 0.88 (8.9) | 66 | 0.28 | 1675 | 0.23 (2.3) | 0.91 | 0.63 (6.4) | 7 | 0.05 | 0.20 (2.0) |
| | 60 | | 100 | 101 | 0.45 | 1350 | 0.42 (4.3) | 1.3 | 1.0 (10) | 96 | 0.41 | 1625 | 0.35 (3.6) | 1.2 | 0.69 (7.0) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) |
| | | 220 | | 103 | 0.46 | 1375 | 0.41 (4.2) | 1.5 | 1.2 (12) | 98 | 0.40 | 1650 | 0.34 (3.5) | 1.3 | 0.87 (8.8) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) |
| | | 90 | 100 | 141 | 0.62 | 1350 | 0.63 (6.4) | 2.0 | 1.6 (16) | 137 | 0.56 | 1625 | 0.53 (5.4) | 1.8 | 1.1 (11) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) |
| | 220 | | | 143 | 0.65 | 1400 | 0.62 (6.3) | 2.2 | 2.0 (20) | 137 | 0.56 | 1650 | 0.52 (5.3) | 2.0 | 1.4 (14) | 7 | 0.05 | 0.39 (4.0) |

Capacitor (Accessory) It is attached to 1-phase motor only.

| A | Output (W) | Voltage (V) | L | W | D | H | t |
|----|------------|-------------|------|------|------|------|---|
| 60 | 6 | 100 | 39.5 | 16 | 26.5 | 30.5 | 4 |
| | | 200 | 39.5 | 16.2 | 27 | 27 | 4 |
| 70 | 15 | 100 | 39.5 | 17.5 | 28 | 30.5 | 4 |
| | | 200 | 39.5 | 22 | 32.5 | 32.5 | 4 |
| 80 | 25 | 100 | 39.5 | 22 | 32.5 | 30.5 | 4 |
| | | 200 | 49.7 | 24 | 34.5 | 34.5 | 4 |
| 40 | 100 | 39.5 | 26.7 | 37 | 41 | 4 | |
| | | 200 | 50 | 26.7 | 37.5 | 38 | 4 |
| 90 | 60 | 100 | 50.2 | 31 | 41 | 42 | 5 |
| | | 200 | 50 | 30.5 | 41 | 41.5 | 4 |
| 90 | 100 | 50.2 | 31 | 41 | 42 | 5 | |
| | | 200 | 50 | 34 | 45 | 45 | 6 |

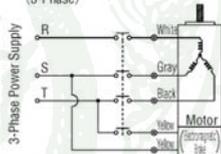
Circuit Layout Diagram

(1-Phase)



The switch connected to CCW side, it rotates counterclockwise.

(3-Phase)



If 2 wires out of white, gray and black are exchanged, this rotates clockwise.

Carry out the contact protection between contact points by spark killer circuit (R1+C1)



R1=10~200Ω (1/4W or more)
C1=0.1~0.33μF (AC125V or AC250V)

Allowable Torque When Gear Head is Mounted

Revolution speed is calculated value for a reference to synchronous revolution speed. Revolution speed generally indicates a value smaller by 2~20% than the shown value depending on the load amount. shows the same direction as the motor revolutions and the others show its opposite direction.

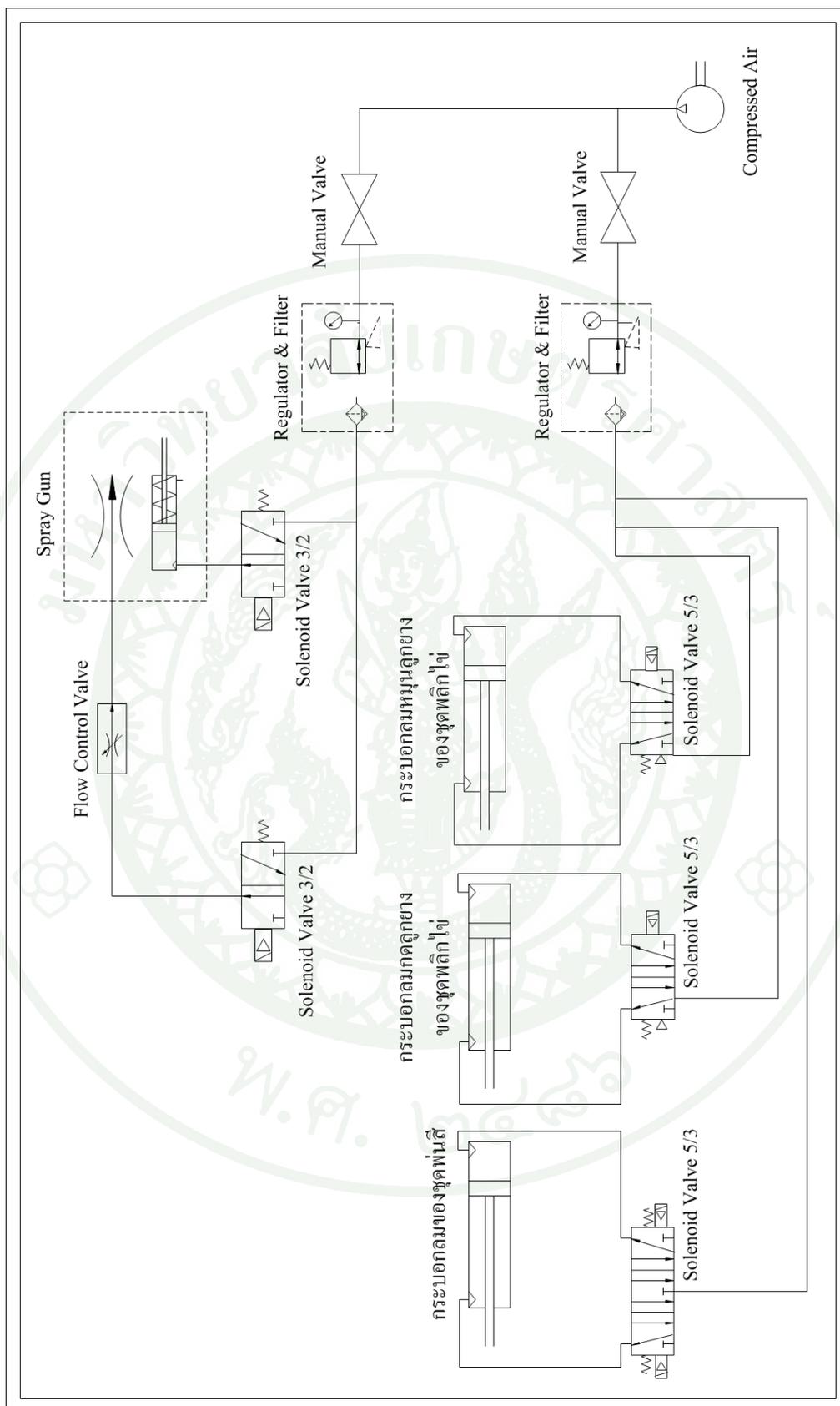
| Catalog No. | Type | A | Output (W) | Revolution Speed (r/min) | Reduction Ratio | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-----|------------|--------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | | | | | 50Hz | 60Hz | 3 | 5 | 7.5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 100 | | | |
| PACMGX | 60 | 6 | 100 | 1300 | 0.098 (1.0) | 0.16 (1.6) | 0.25 (2.5) | 0.26 (2.7) | 0.33 (3.4) | 0.40 (4.1) | 0.49 (5.0) | 0.53 (5.4) | 0.66 (6.7) | 0.79 (8.1) | 0.95 (9.7) | 1.17 (11.9) | 1.57 (15.9) | 2.25 (22.7) | 3.25 (32.7) | 4.45 (44.7) | | |
| | | | | | 200 | 0.24 (2.4) | 0.39 (3.9) | 0.59 (5.9) | 0.66 (6.6) | 0.80 (8.0) | 0.98 (9.8) | 1.18 (11.8) | 1.57 (15.7) | 1.86 (18.6) | 2.25 (22.5) | 2.25 (22.5) | 3.82 (38.2) | 4.90 (49.0) | 6.37 (63.7) | 8.40 (84.0) | 10.9 (109) | 14.3 (143) |
| | | | | | 200 | 0.39 (3.9) | 0.66 (6.6) | 0.98 (9.8) | 1.08 (10.8) | 1.27 (12.7) | 1.57 (15.7) | 1.96 (19.6) | 2.06 (20.6) | 2.55 (25.5) | 3.14 (31.4) | 3.14 (31.4) | 3.82 (38.2) | 4.90 (49.0) | 6.37 (63.7) | 8.40 (84.0) | 10.9 (109) | 14.3 (143) |
| | 70 | 15 | 100 | 1300 | 0.66 (6.6) | 1.08 (10.8) | 1.57 (15.7) | 1.76 (17.6) | 2.25 (22.5) | 2.74 (27.4) | 3.23 (32.3) | 3.53 (35.3) | 4.41 (44.1) | 5.29 (52.9) | 6.37 (63.7) | 8.40 (84.0) | 10.9 (109) | 14.3 (143) | 18.8 (188) | 24.7 (247) | 32.9 (329) | |
| | | | | | 200 | 0.98 (9.8) | 1.57 (15.7) | 2.35 (23.5) | 2.65 (26.5) | 3.14 (31.4) | 3.92 (39.2) | 4.70 (47.0) | 5.29 (52.9) | 6.27 (62.7) | 7.55 (75.5) | 9.11 (91.1) | 9.11 (91.1) | 13.2 (132) | 19.6 (196) | 25.5 (255) | 33.8 (338) | 44.5 (445) |
| | | | | | 200 | 1.37 (13.7) | 2.25 (22.5) | 3.43 (34.3) | 3.72 (37.2) | 4.51 (45.1) | 5.68 (56.8) | 6.76 (67.6) | 7.55 (75.5) | 9.02 (90.2) | 10.9 (109) | 13 (13) | 13 (13) | 19.6 (196) | 25.5 (255) | 33.8 (338) | 44.5 (445) | 58.3 (583) |
| 90 | 40 | 100 | 1300 | 1.37 (13.7) | 2.25 (22.5) | 3.43 (34.3) | 3.72 (37.2) | 4.51 (45.1) | 5.68 (56.8) | 6.76 (67.6) | 7.55 (75.5) | 9.02 (90.2) | 10.9 (109) | 13 (13) | 13 (13) | 19.6 (196) | 25.5 (255) | 33.8 (338) | 44.5 (445) | | | |
| | | | | 200 | 1.37 (13.7) | 2.25 (22.5) | 3.43 (34.3) | 3.72 (37.2) | 4.51 (45.1) | 5.68 (56.8) | 6.76 (67.6) | 7.55 (75.5) | 9.02 (90.2) | 10.9 (109) | 13 (13) | 13 (13) | 19.6 (196) | 25.5 (255) | 33.8 (338) | 44.5 (445) | | |
| | | | | 200 | 1.37 (13.7) | 2.25 (22.5) | 3.43 (34.3) | 3.72 (37.2) | 4.51 (45.1) | 5.68 (56.8) | 6.76 (67.6) | 7.55 (75.5) | 9.02 (90.2) | 10.9 (109) | 13 (13) | 13 (13) | 19.6 (196) | 25.5 (255) | 33.8 (338) | 44.5 (445) | | |

Gear Head (For motor output of 40W or Lower)

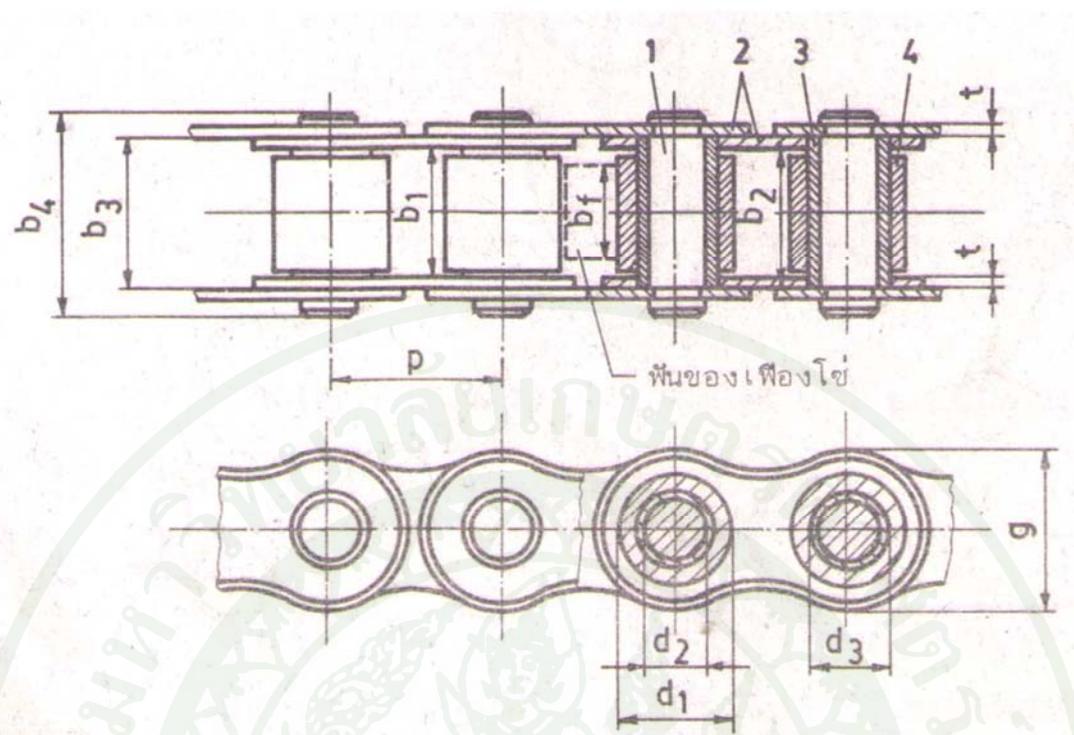
| Catalog No. | Type | A | Reduction Ratio | | | | | Unit Price | | | | |
|-------------|------|-----|-----------------|------|-------|--------|-------|------------|-------|-------|-------|----|
| | | | Selectable | 3-18 | 20-36 | 40-180 | 3,590 | 3,890 | 4,200 | | | |
| PACMGX | 60 | 6 | 3 | 3.6 | 5 | 6 | 7.5 | 9 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| | | | 12.5 | 15 | 18 | 20 | 25 | 3.890 | 4,240 | 4,490 | | |
| | | | 30 | 36 | 50 | 60 | 75 | 90 | 3,990 | 4,290 | 4,550 | |
| 90 | 40 | 100 | 100 | 120 | 150 | 180 | 4,580 | 4,900 | 5,320 | | | |

Gear Head (For motor output of 60W or Higher)

| Catalog No. | Type | A | Reduction Ratio | | | | | Unit Price | | | | |
|-------------|------|-----|-----------------|-----|-------|-------|--------|------------|-------|-------|-------|----|
| | | | Selectable | 3-9 | 10-18 | 20-60 | 75-180 | 6,860 | 7,830 | 8,190 | 8,750 | |
| PACMGZ | 90 | 100 | 3 | 3.6 | 5 | 6 | 7.5 | 9 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| | | | 12.5 | 15 | 18 | 20 | 25 | 6,860 | 7,830 | 8,190 | 8,750 | |
| | | | 30 | 36 | 50 | 60 | 75 | 90 | 100 | 120 | | |



ภาพผนวกที่ ๗ Pneumatic Diagram ของเครื่องพ่นสีไขเย็บผ้า 1 สถานีพ่นสี



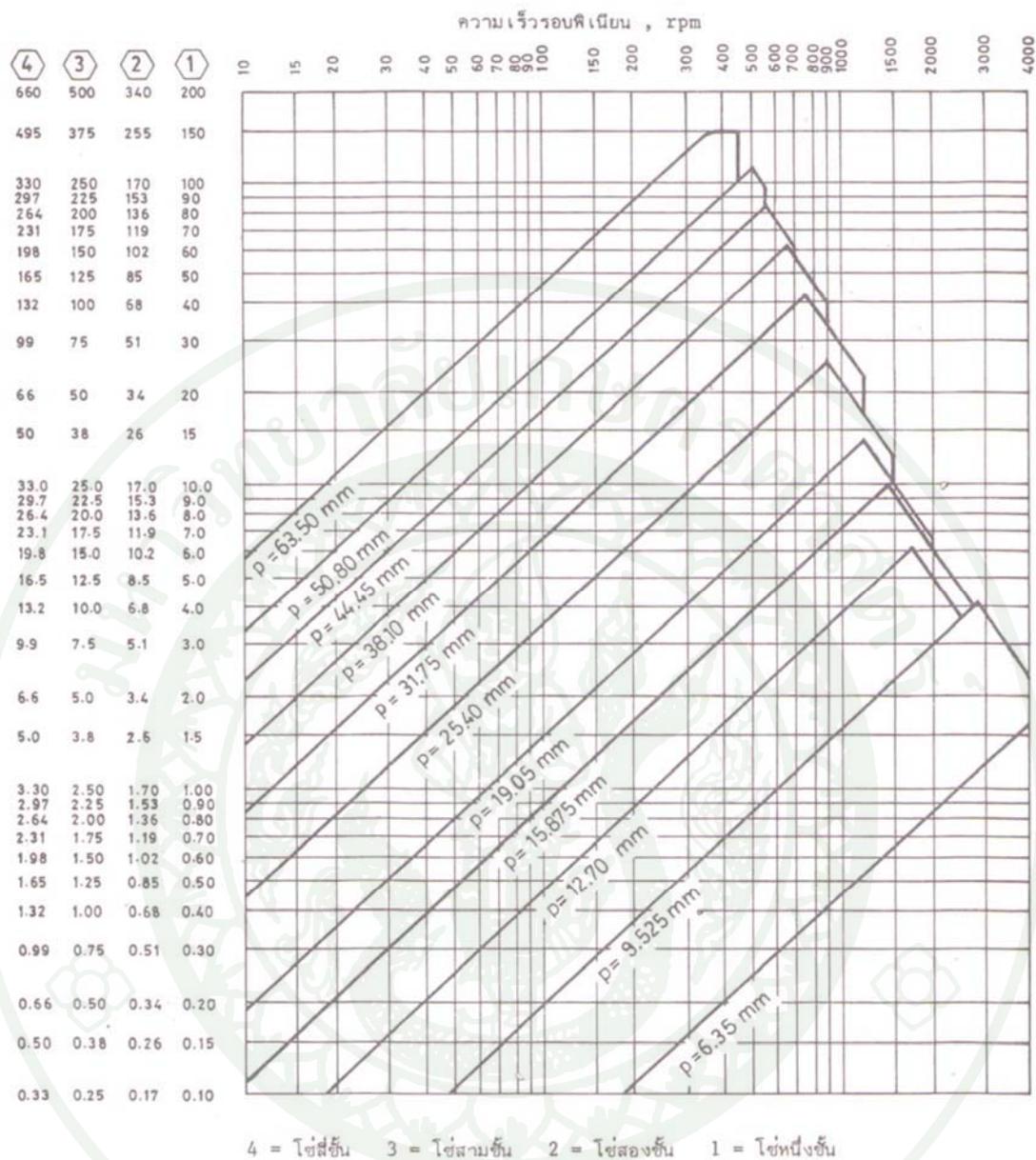
ภาพผนวกที่ ข8 รายละเอียดขนาดโซ่โรลเลอร์

ที่มา : วรวิทย์ และ ชาญ (2541)



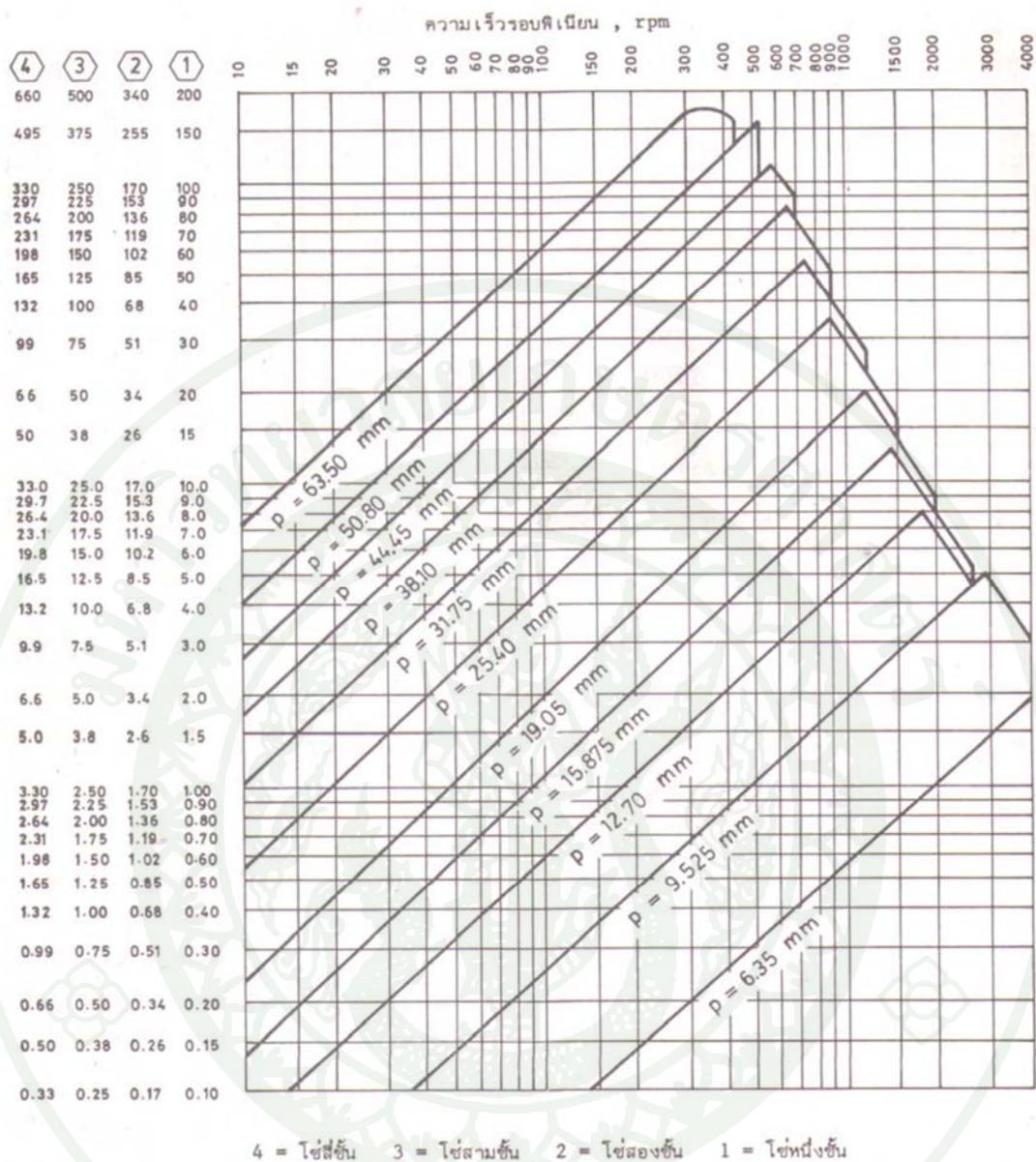
ภาพผนวกที่ ข9 แผนภูมิใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ B (สำหรับฟัน 19 ฟัน)

ที่มา : วริทธิ และ ชาญ (2541)



ภาพผนวกที่ 10 แผนภูมิใช้เลือกโซ่โรลเลอร์แบบ A (สำหรับพีเนียน 15 ฟัน)

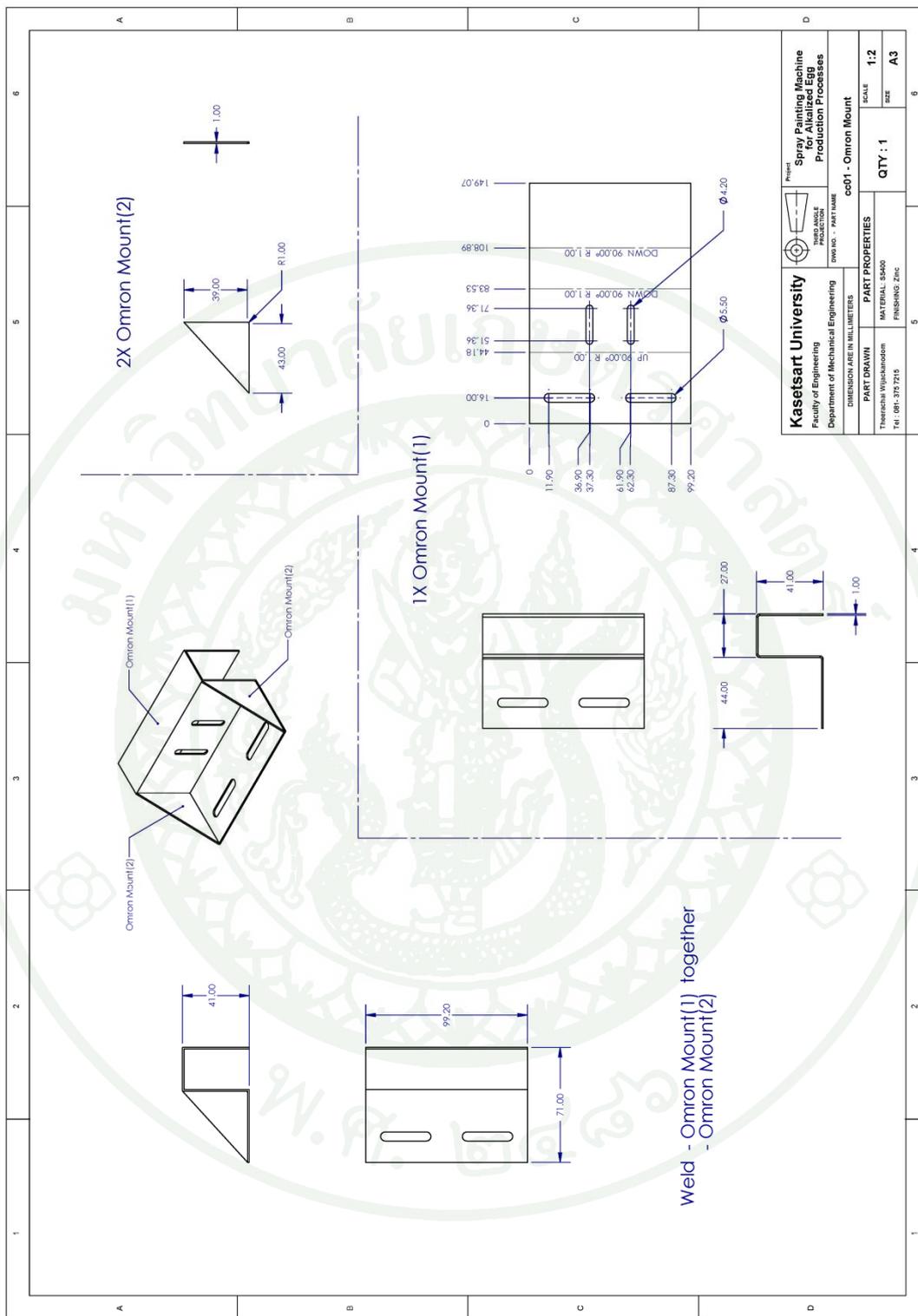
ที่มา : วรรณิ์ และ ชาญ (2541)

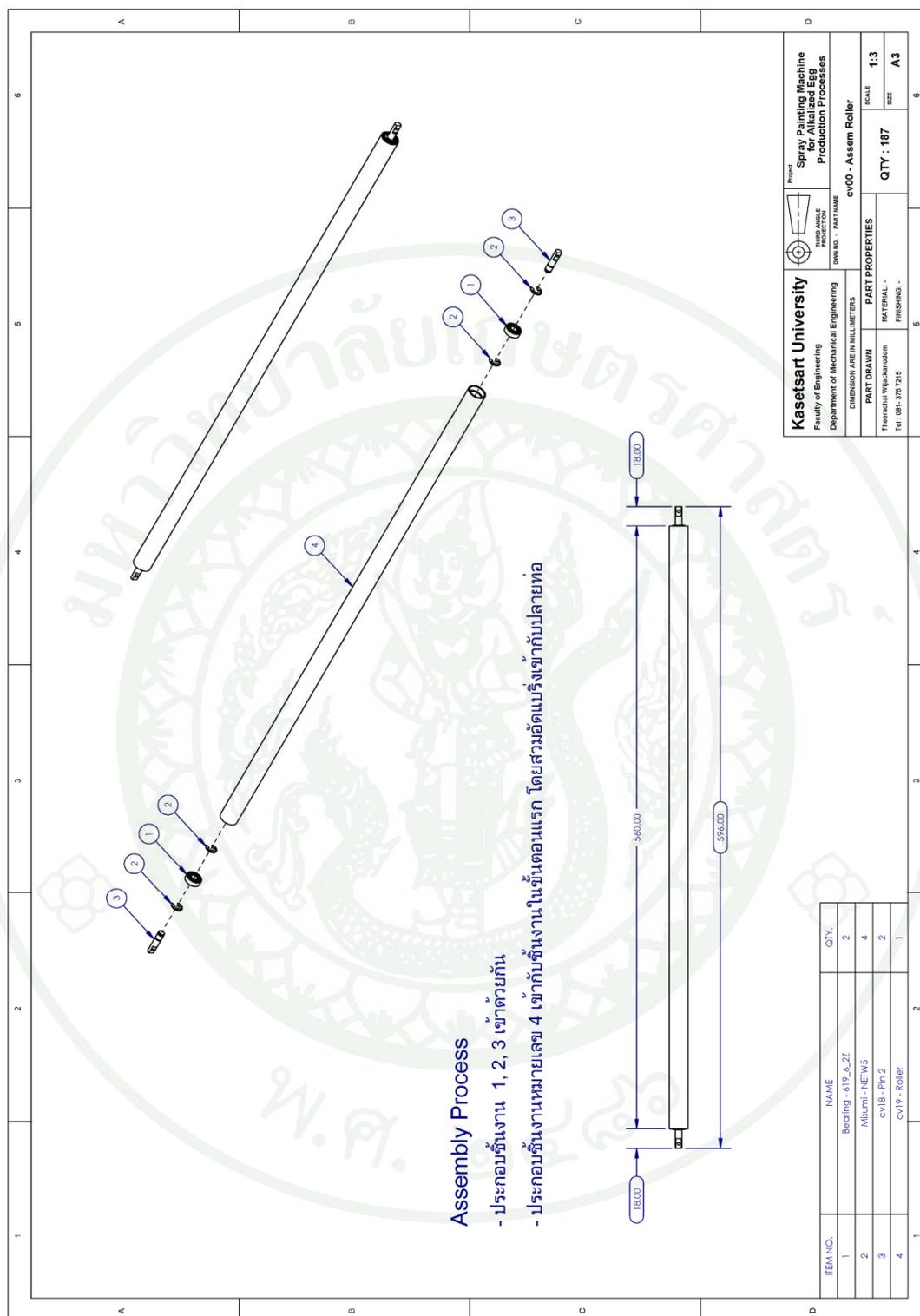


ภาพผนวกที่ ข11 แผนภูมิใช้เลือกโซ่โรลเลอร์แบบ A (สำหรับฟิเนียน 19 ฟัน)

ที่มา : วริทธิ์ และ ชาญ (2541)







Kasetsart University
Faculty of Engineering
Department of Mechanical Engineering

Project: **Spray Painting Machine for Alalized Egg Production Processes**

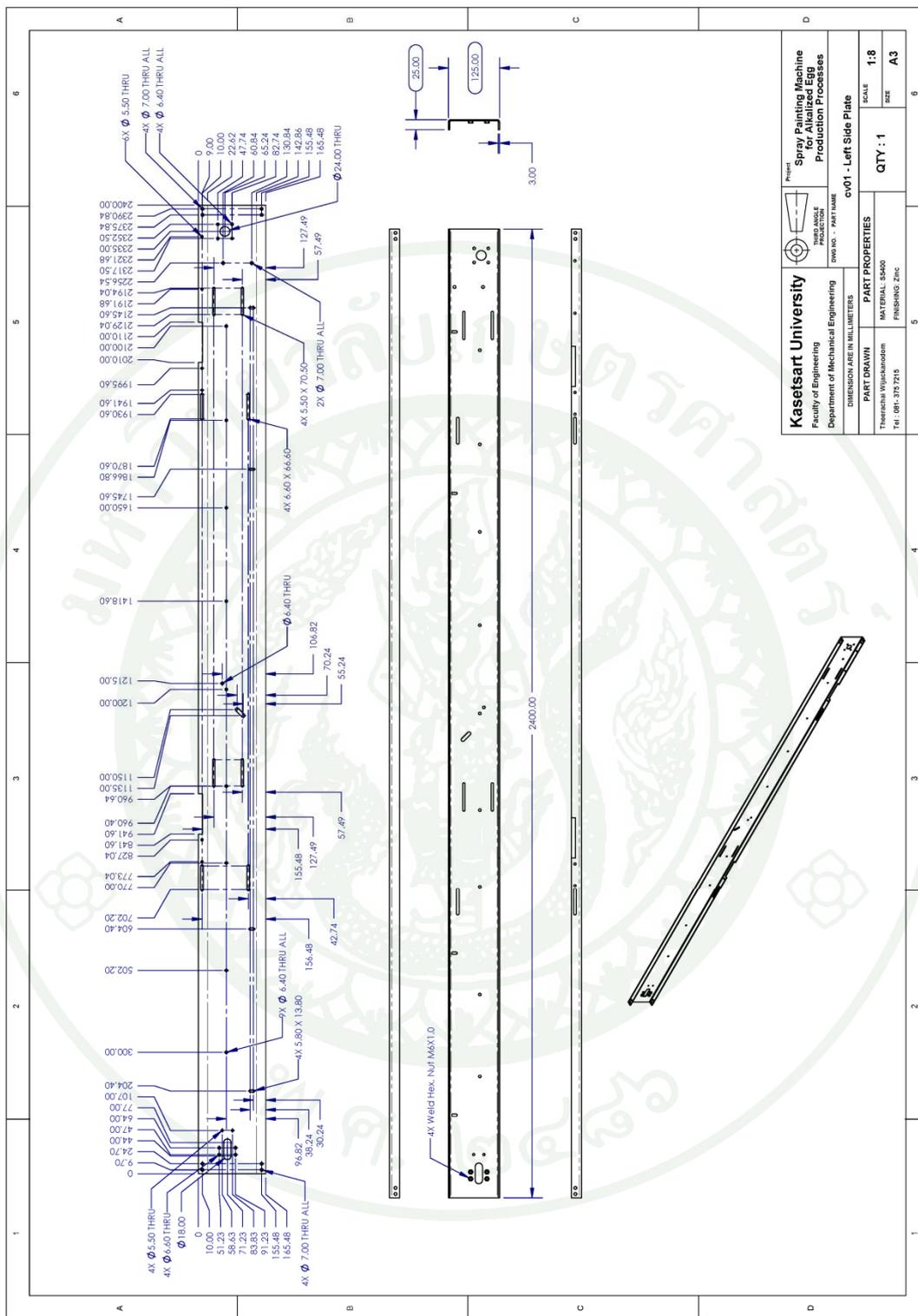
PRODUCTION PRODUCTION PRODUCTION PRODUCTION

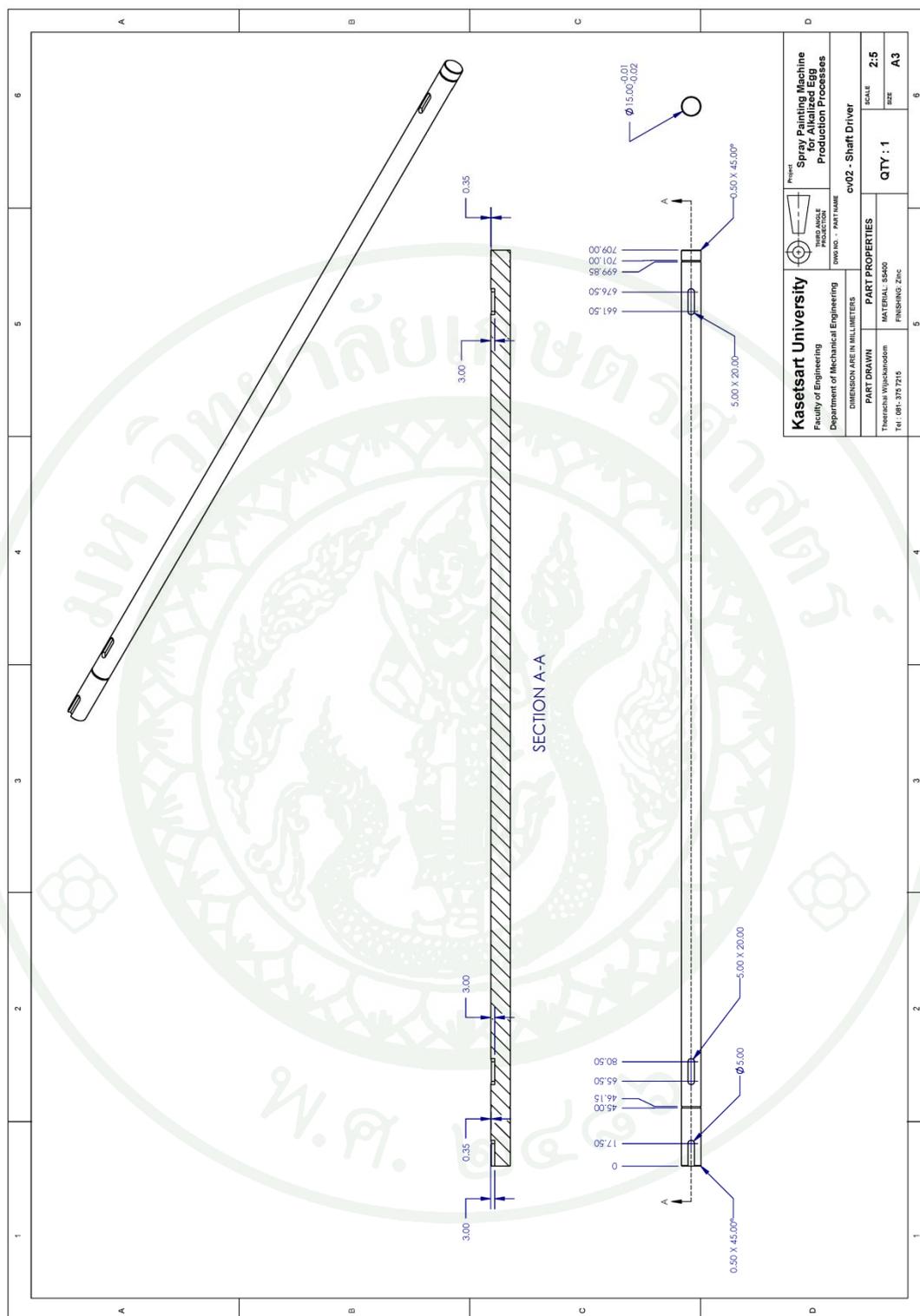
DWG. NO. : PART NAME
cv00 - Assem Roller

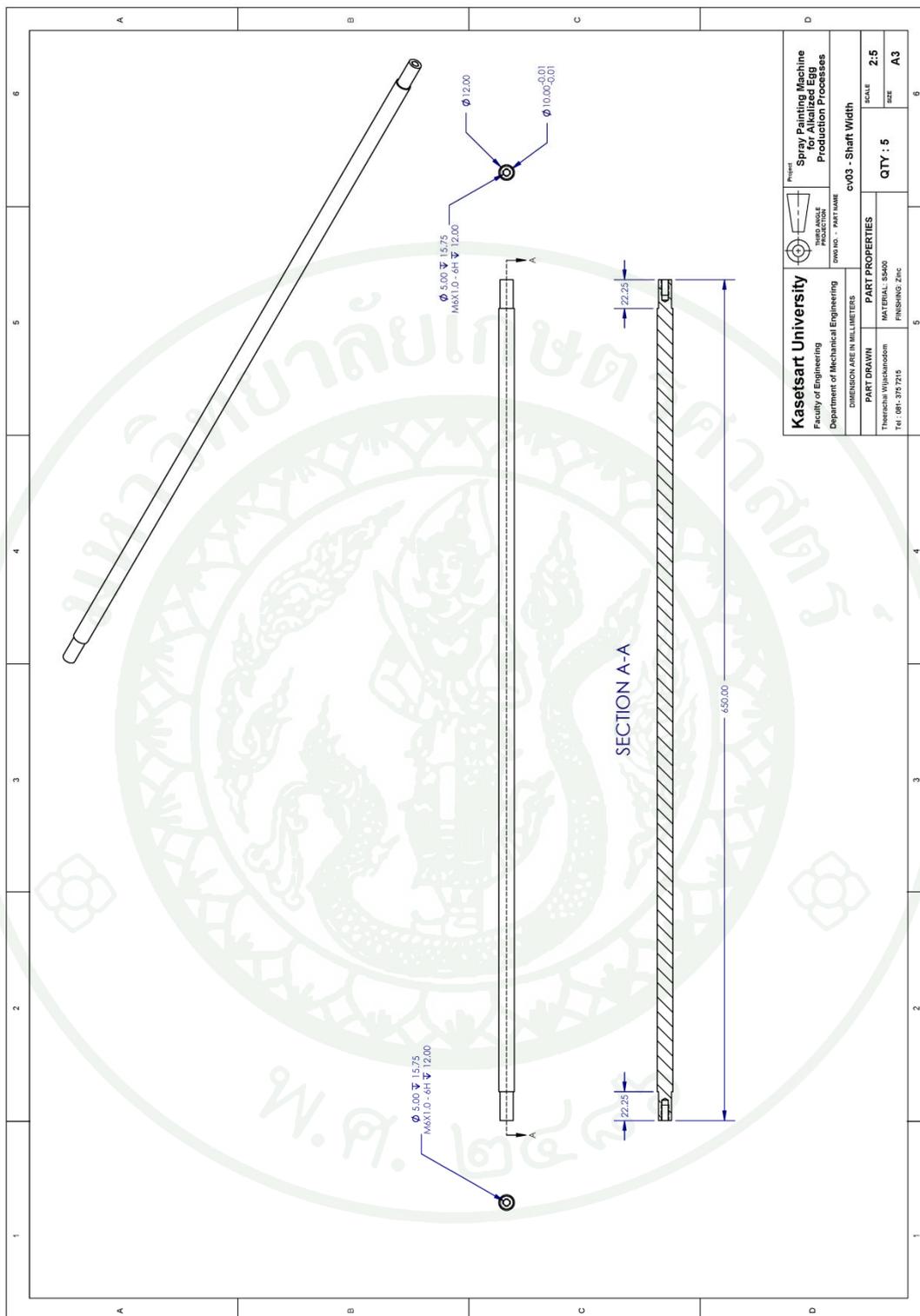
PART PROPERTIES

PART DRAWN: Thirachai Wiphamadorn
MATERIAL: PENDING

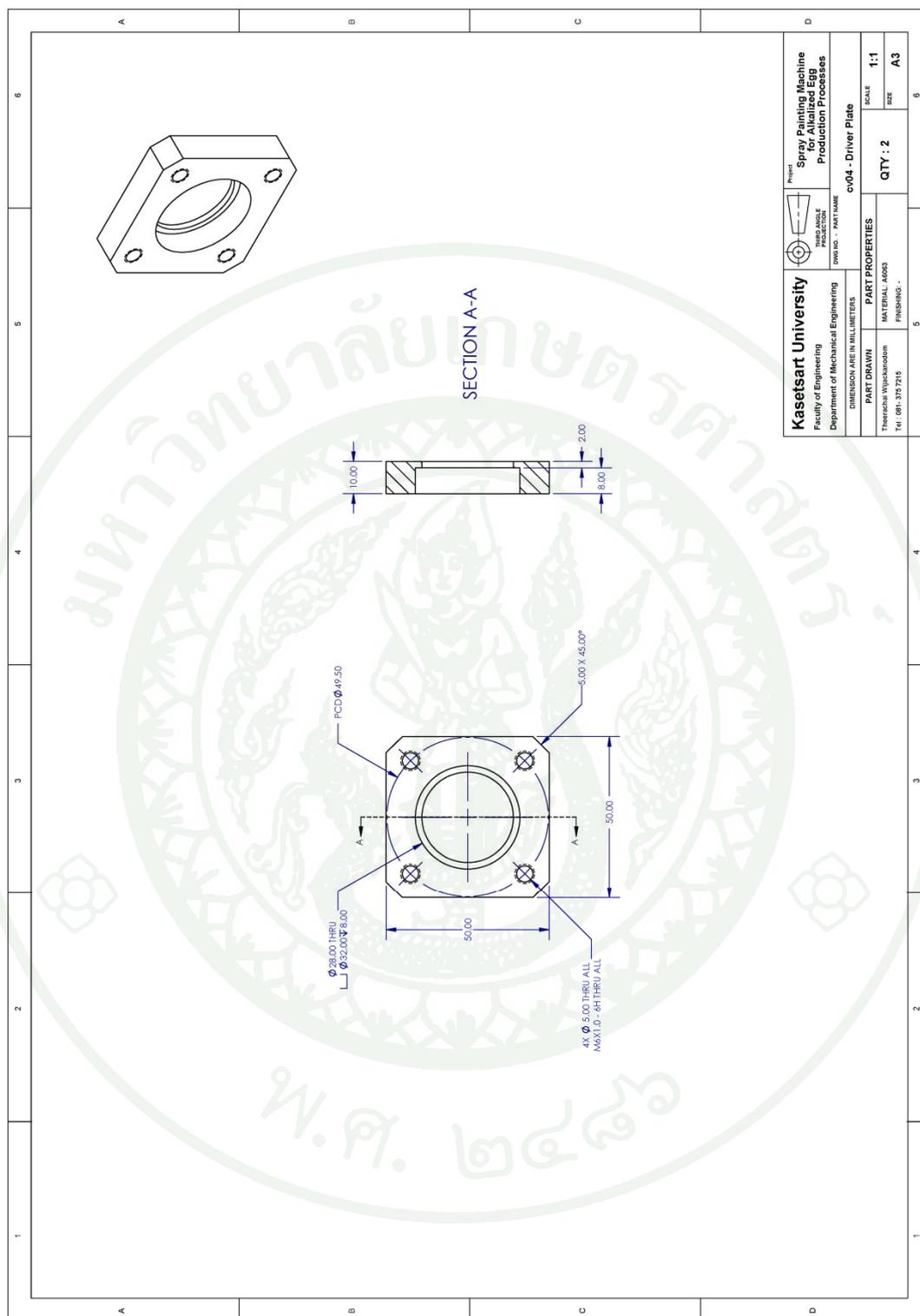
SCALE: 1:3
QTY: 187
SIZE: A3



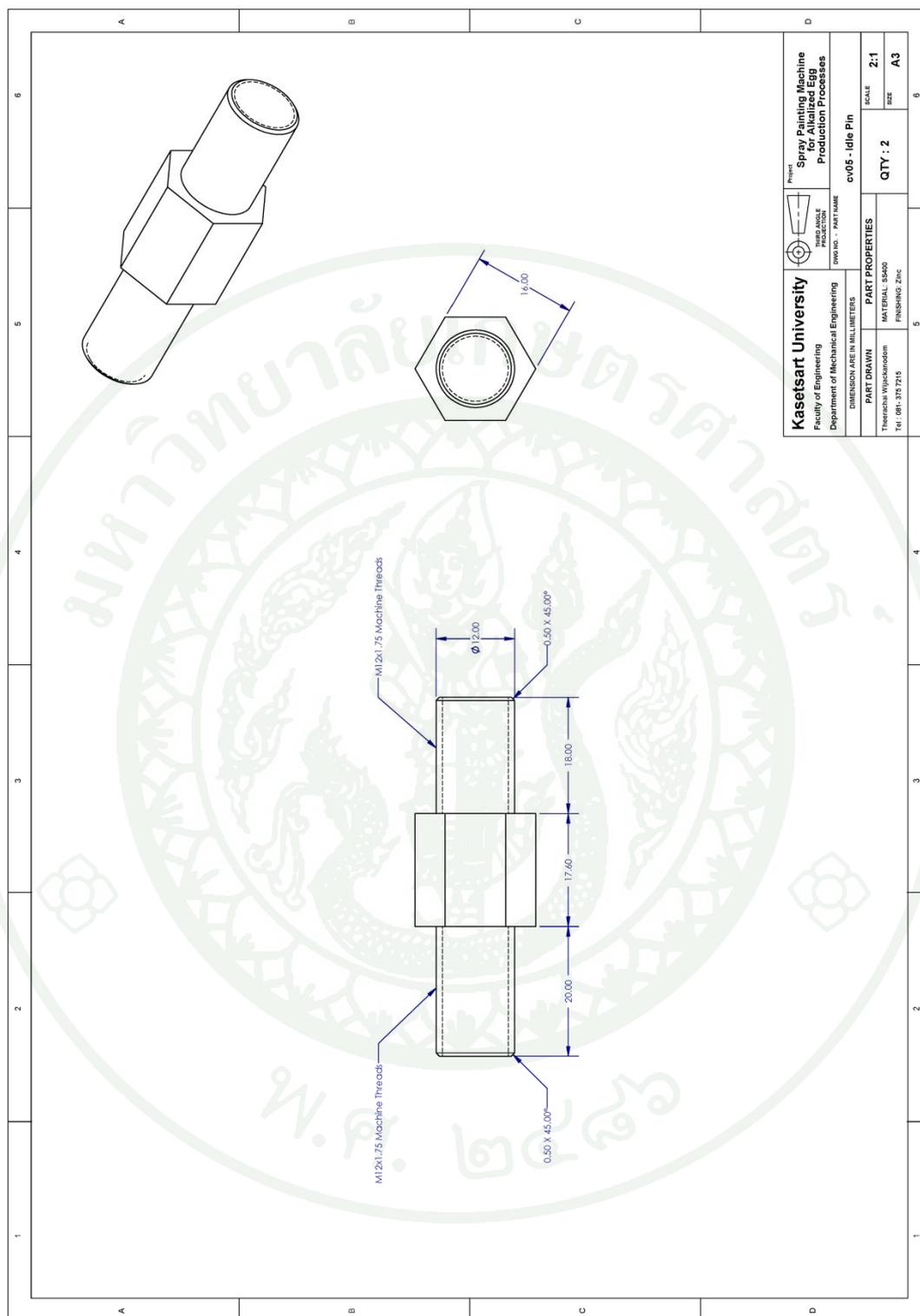


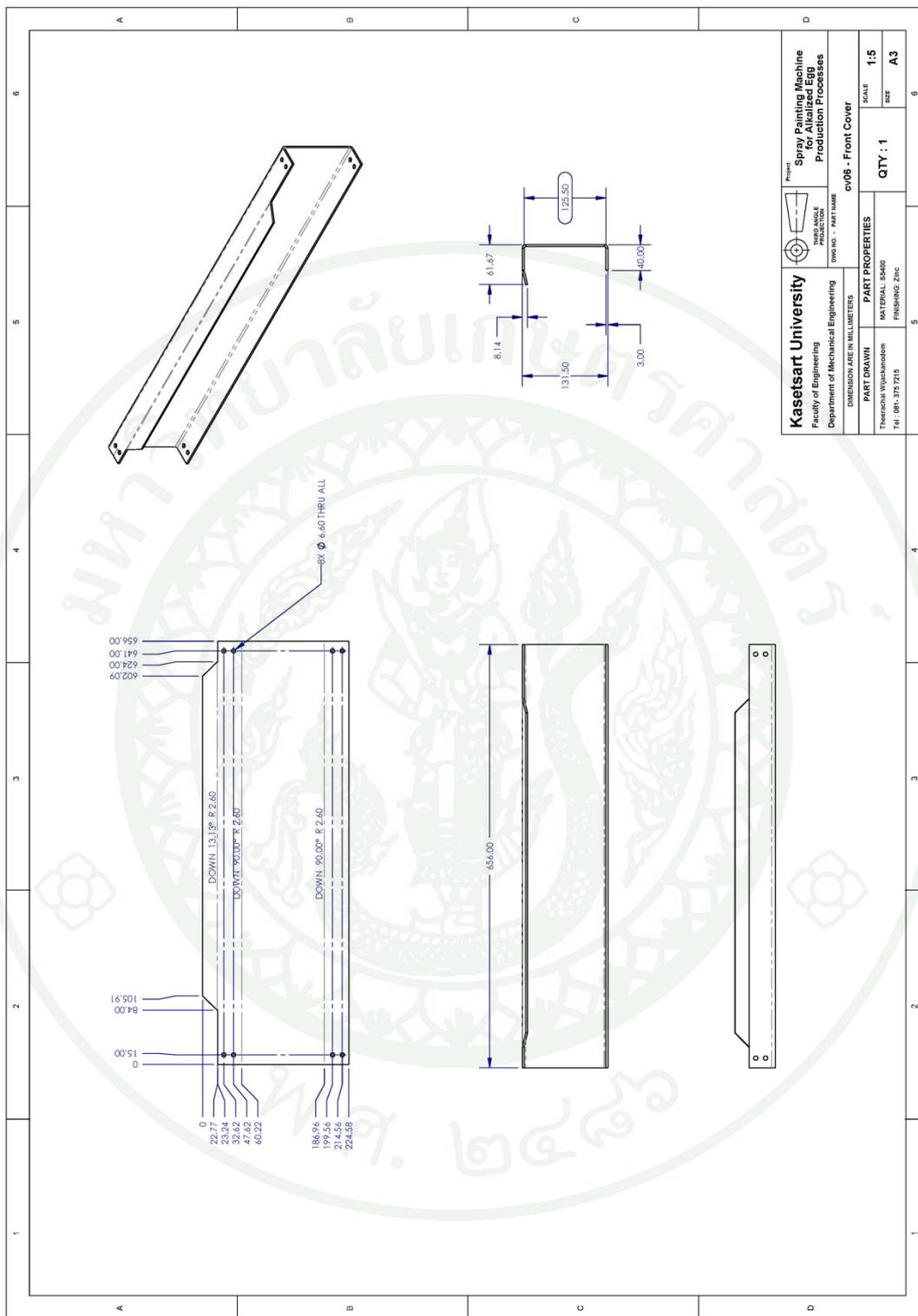


| | | | |
|---|--|--|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes Dwg. No. - PART NAME: cv03 - Shaft Width | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISH: ZINC | |
| PART DRAWN: Thirachai Wijiamadorn TEL: 081-3151215 | | SCALE: 2:5 QTY: 5 SIZE: A3 | |

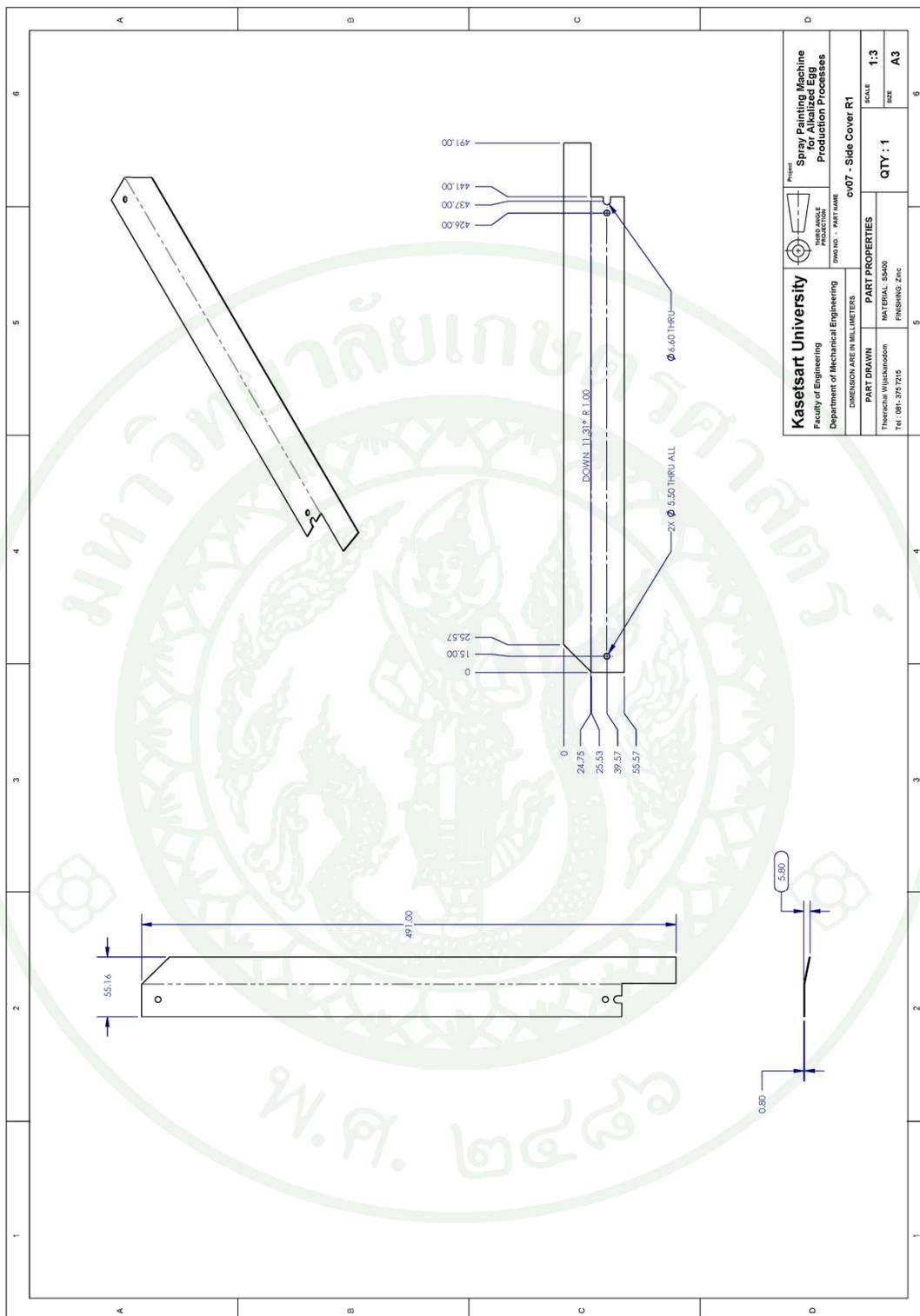


| | | |
|--|--|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | PRODUCTION PROCESS cv04 - Driver Plate | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |
| | | |
| PART DRAWN Thirachai Wijiamrodorn TEL: 091-3151210 | PART PROPERTIES MATERIAL: A6063 FINISHING: - | SCALE 1:1 |
| QTY: 2 | | SIZE A3 |





| | | | |
|--|---|--|------------------------------------|
| Kaetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes | DWG NO. - PART NAME cv06 - Front Cover | SCALE 1:5 |
| | | | QTY: 1 SIZE A3 |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES | MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | |
| PART DRAWN Thirachai Wijitakarnsom TEL: 081-317210 | PART PROPERTIES | | |



Kaetsat University
 Faculty of Engineering
 Department of Mechanical Engineering

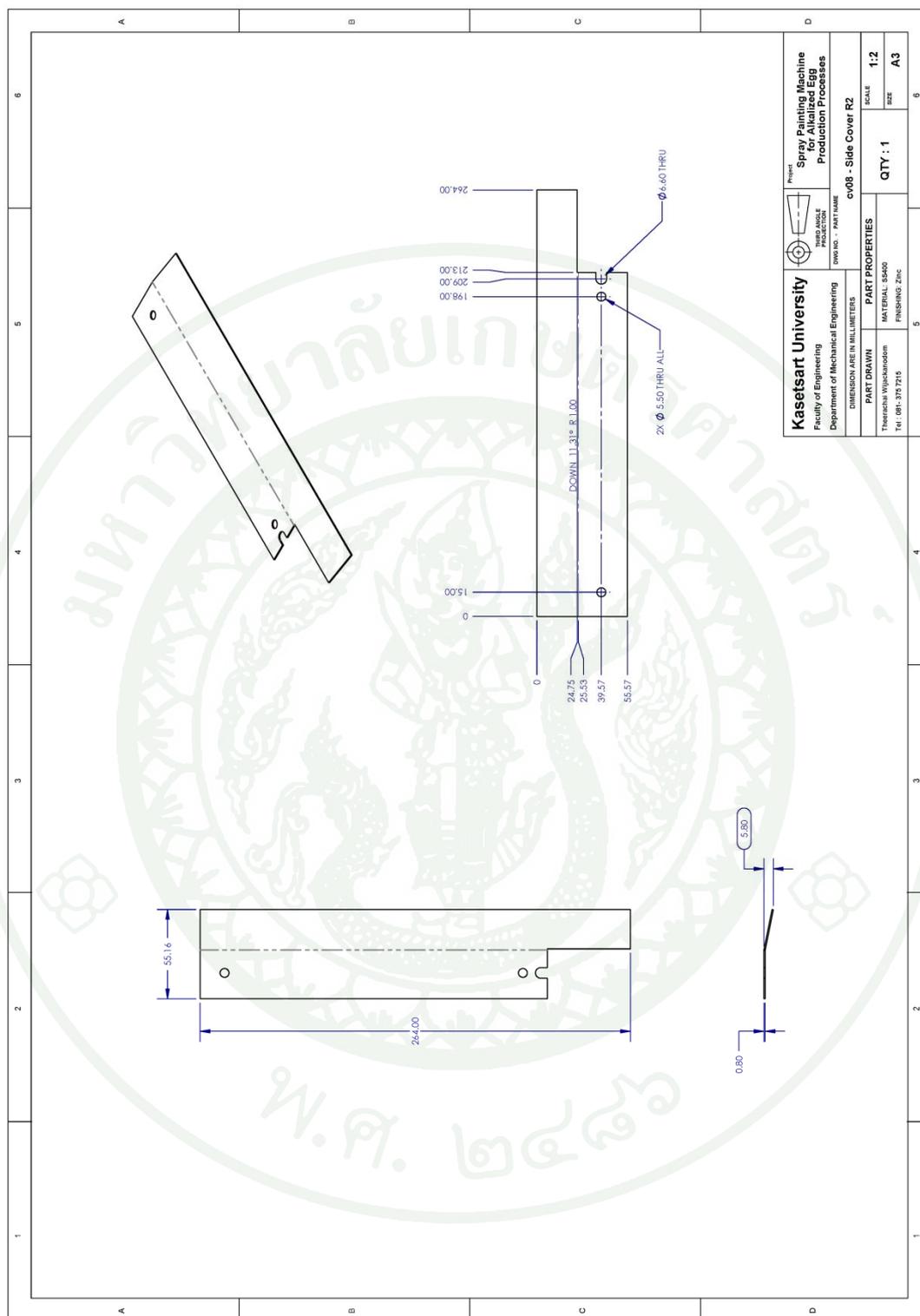
Project: **Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes**

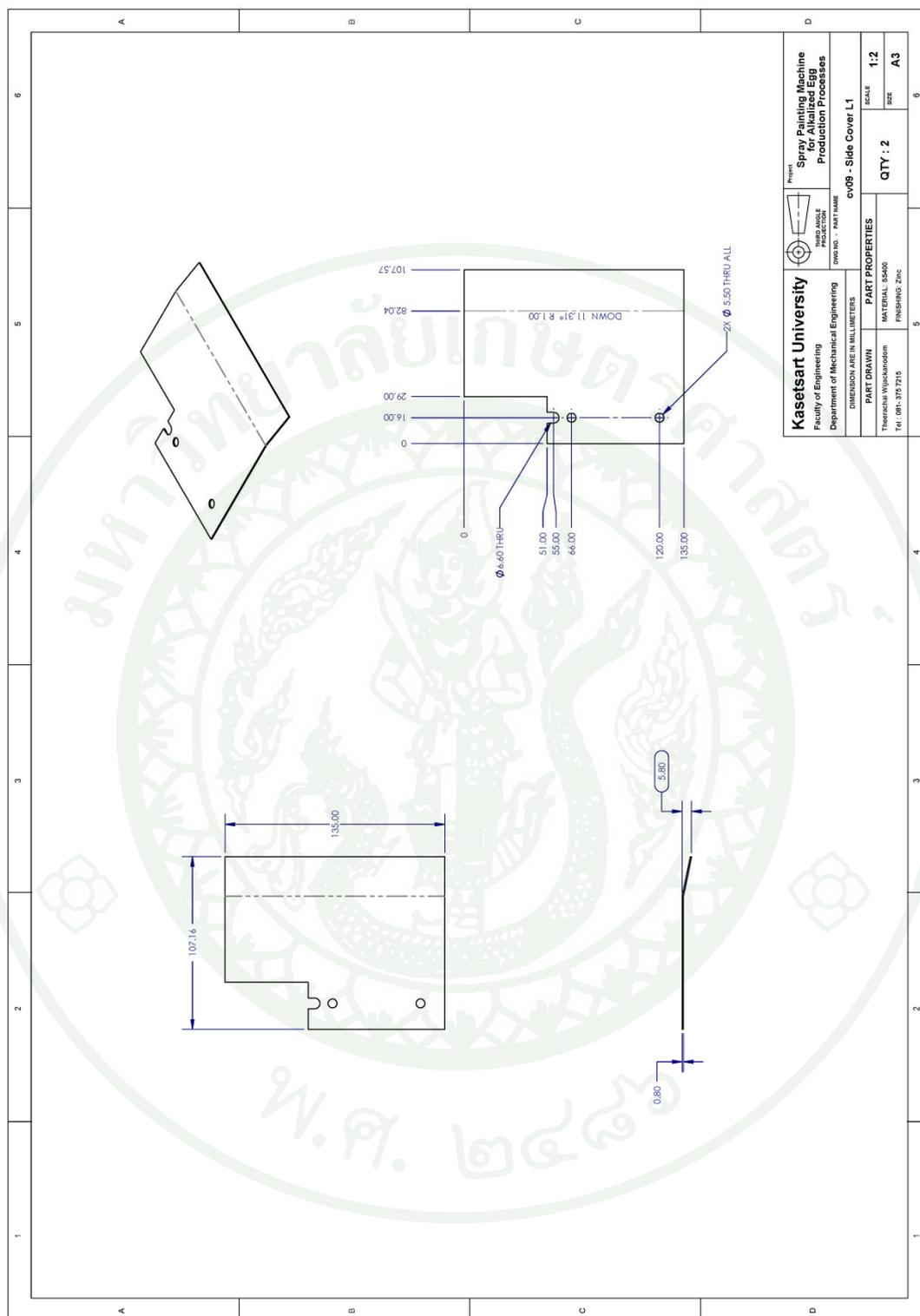
PROFESSOR: **Dr. Praporn Pongpanich**
 INSTRUCTOR: **Dr. Praporn Pongpanich**

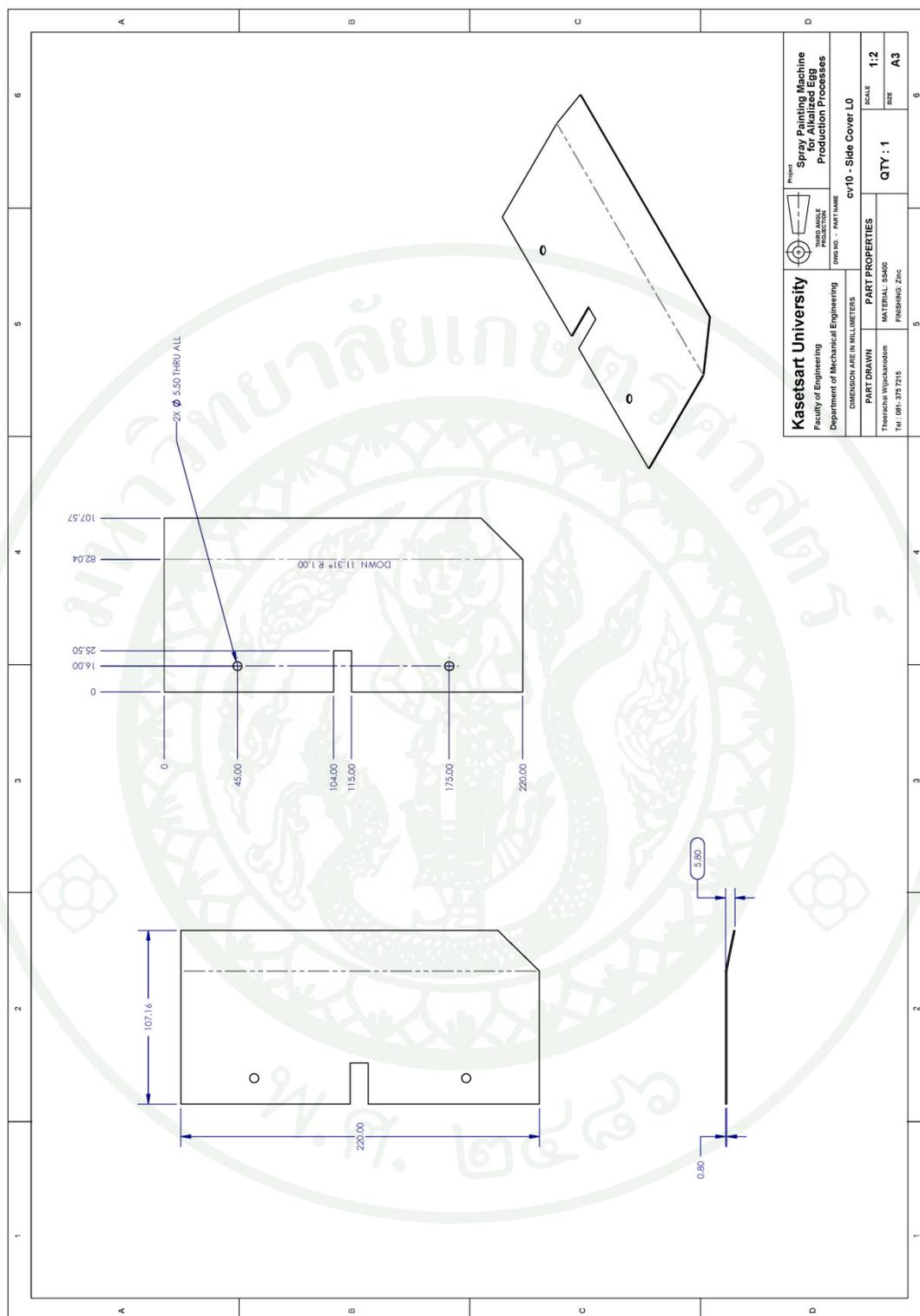
DWG. NO. - PART NAME: **c007 - Side Cover R1**

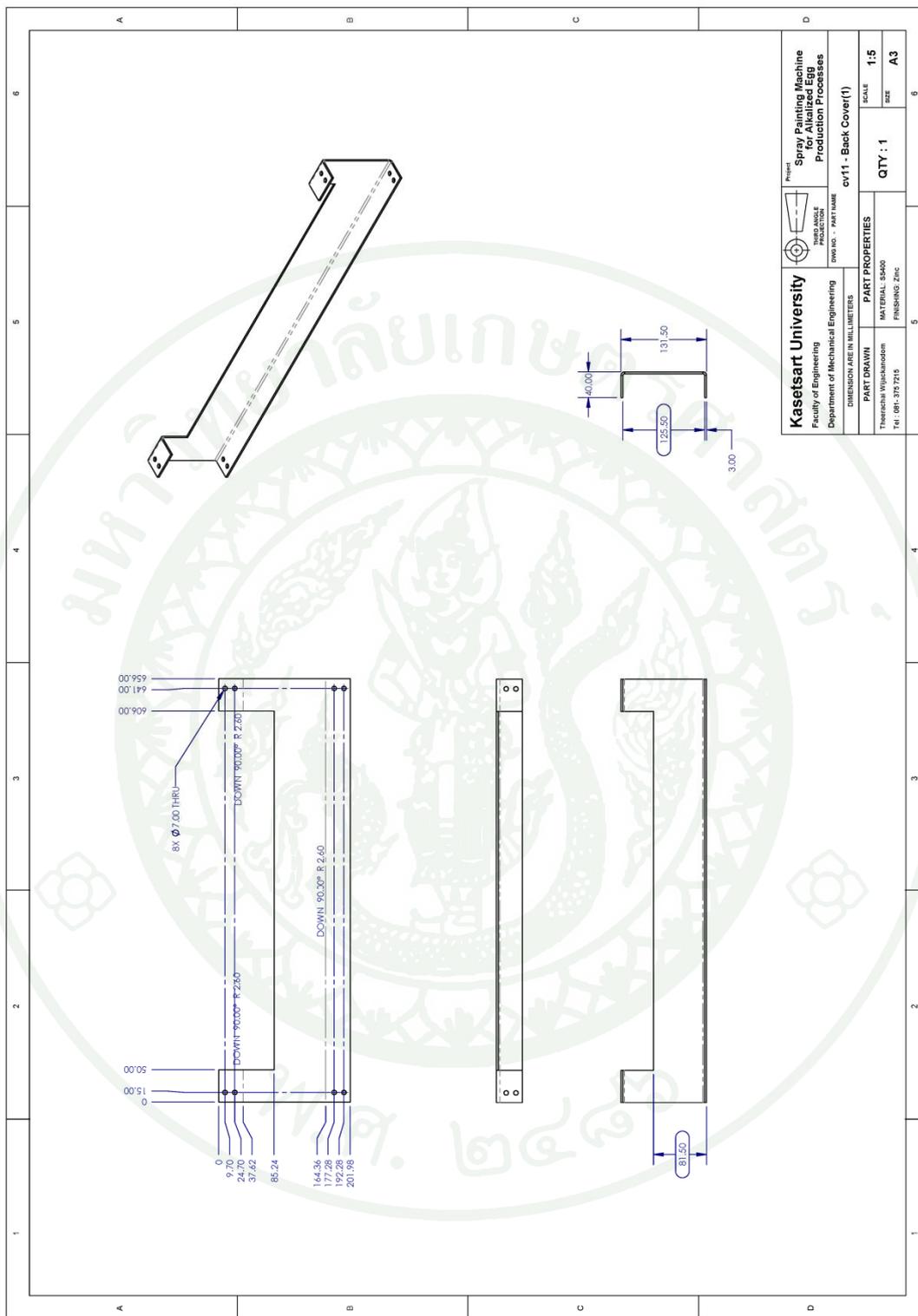
| PART PROPERTIES | |
|-----------------|-----------------------|
| PART DRAWN | Thirachai Wijiamadorn |
| MATERIAL | S660 |
| FINISHING | ZINC |

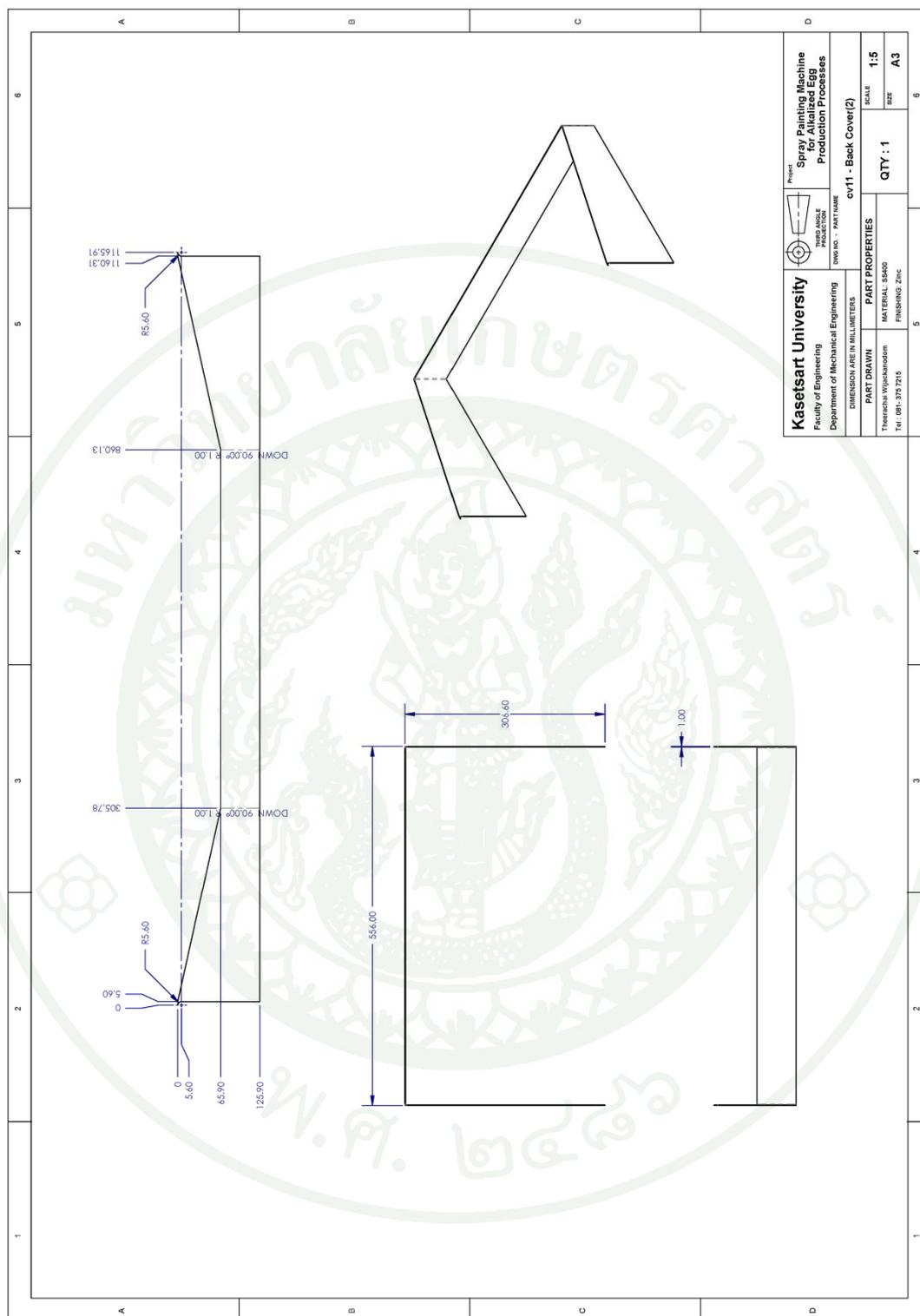
| PART PROPERTIES | |
|-----------------|----------|
| SCALE | 1:3 |
| QTY: 1 | SIZE: A3 |

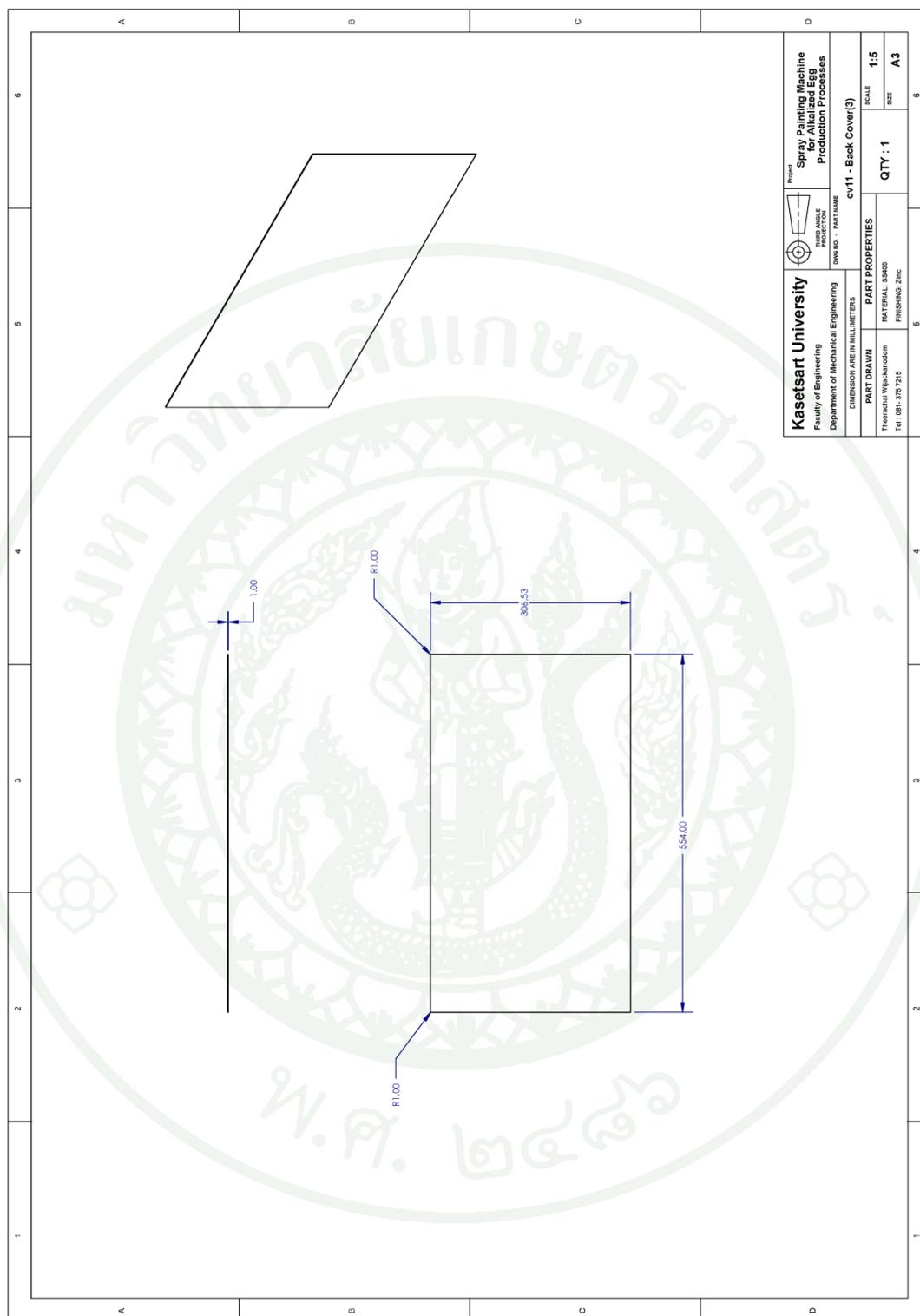


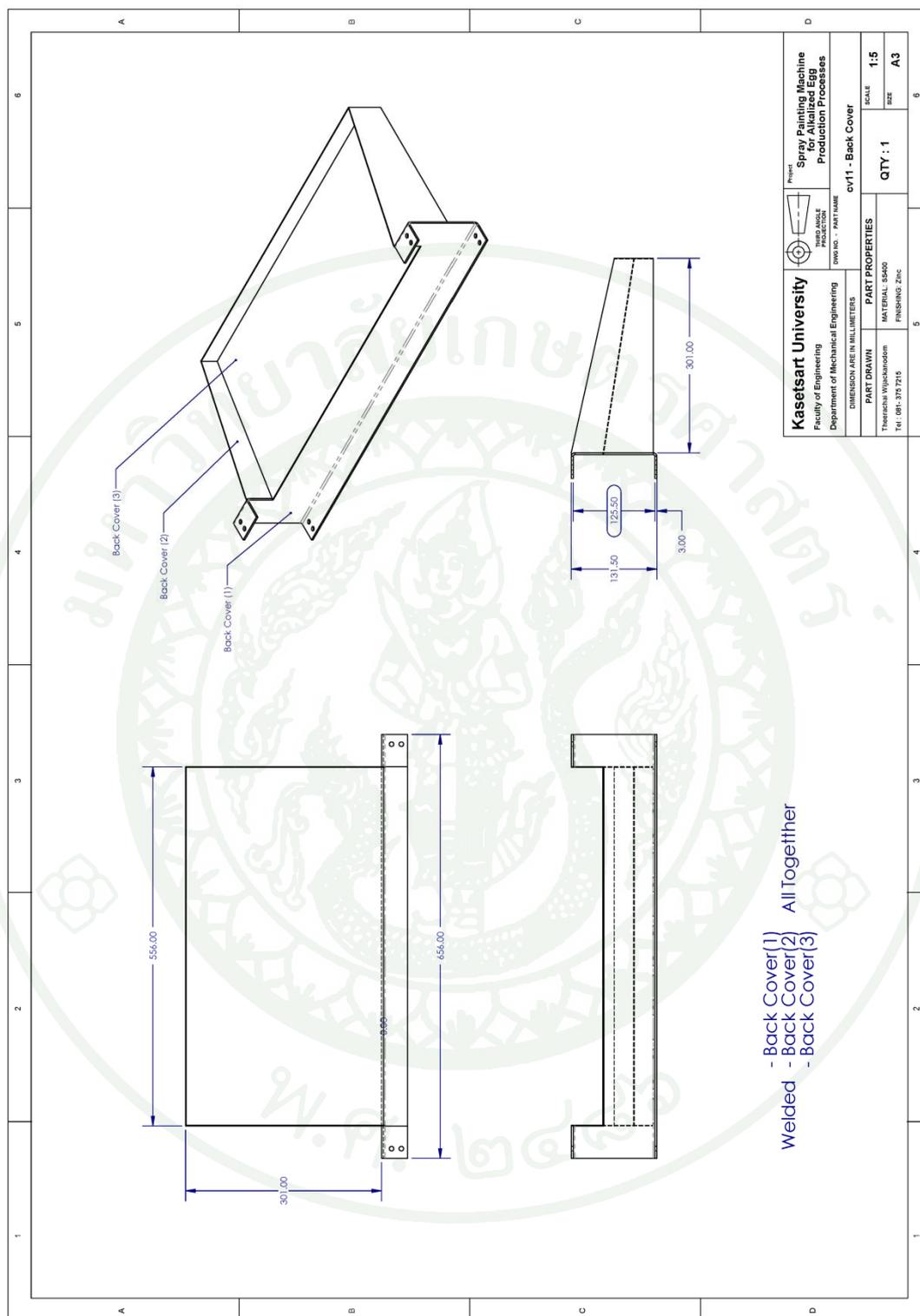






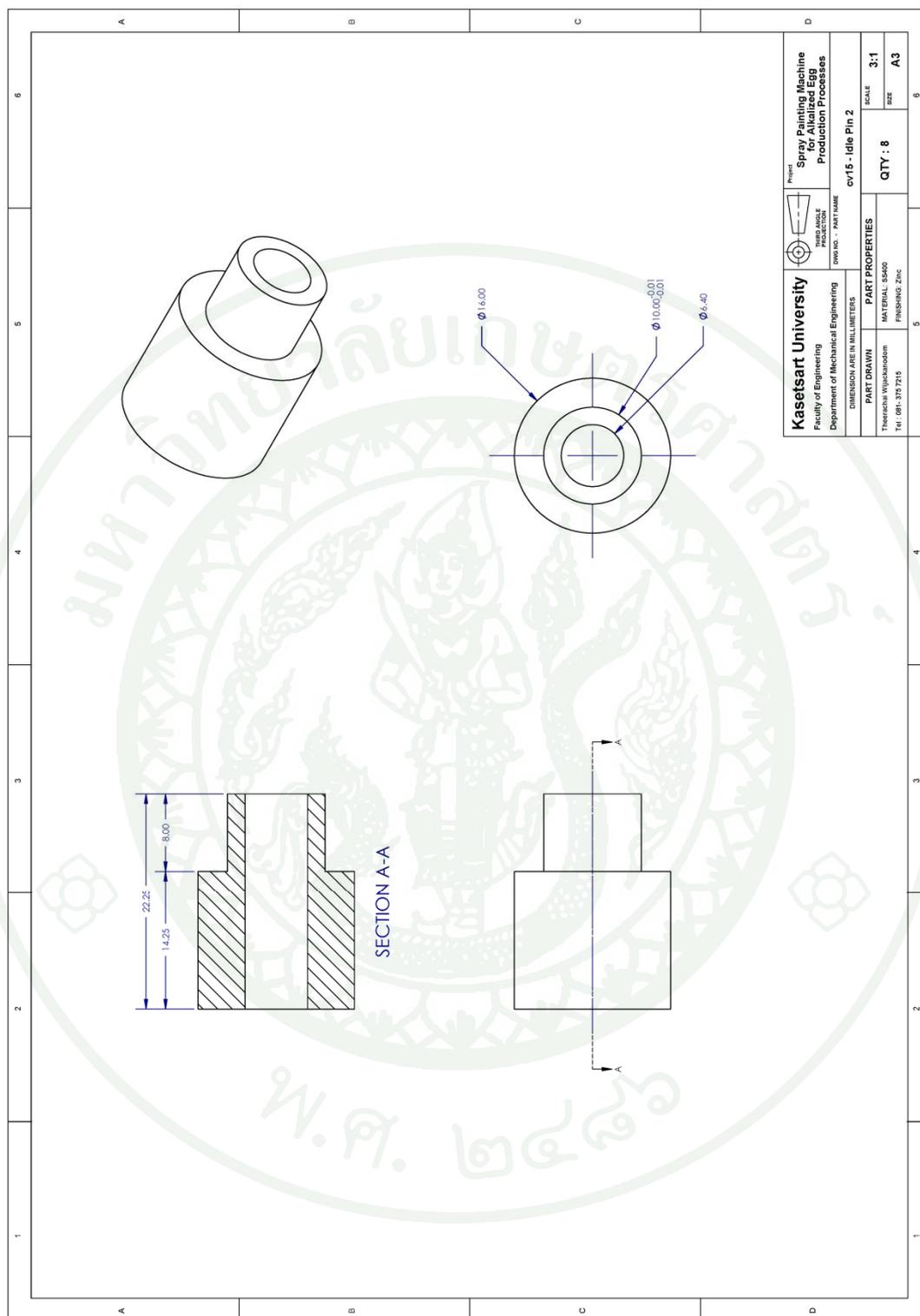




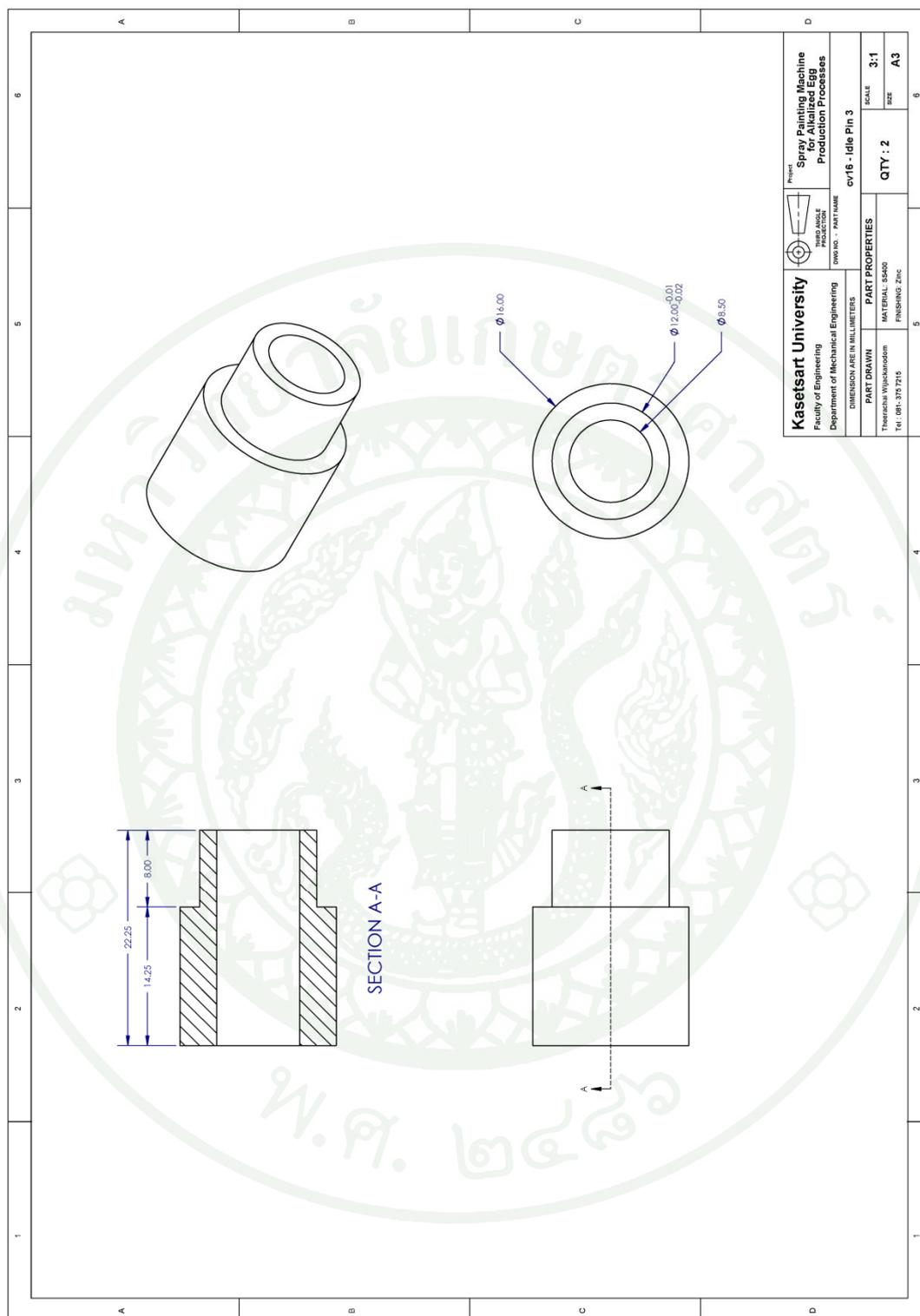


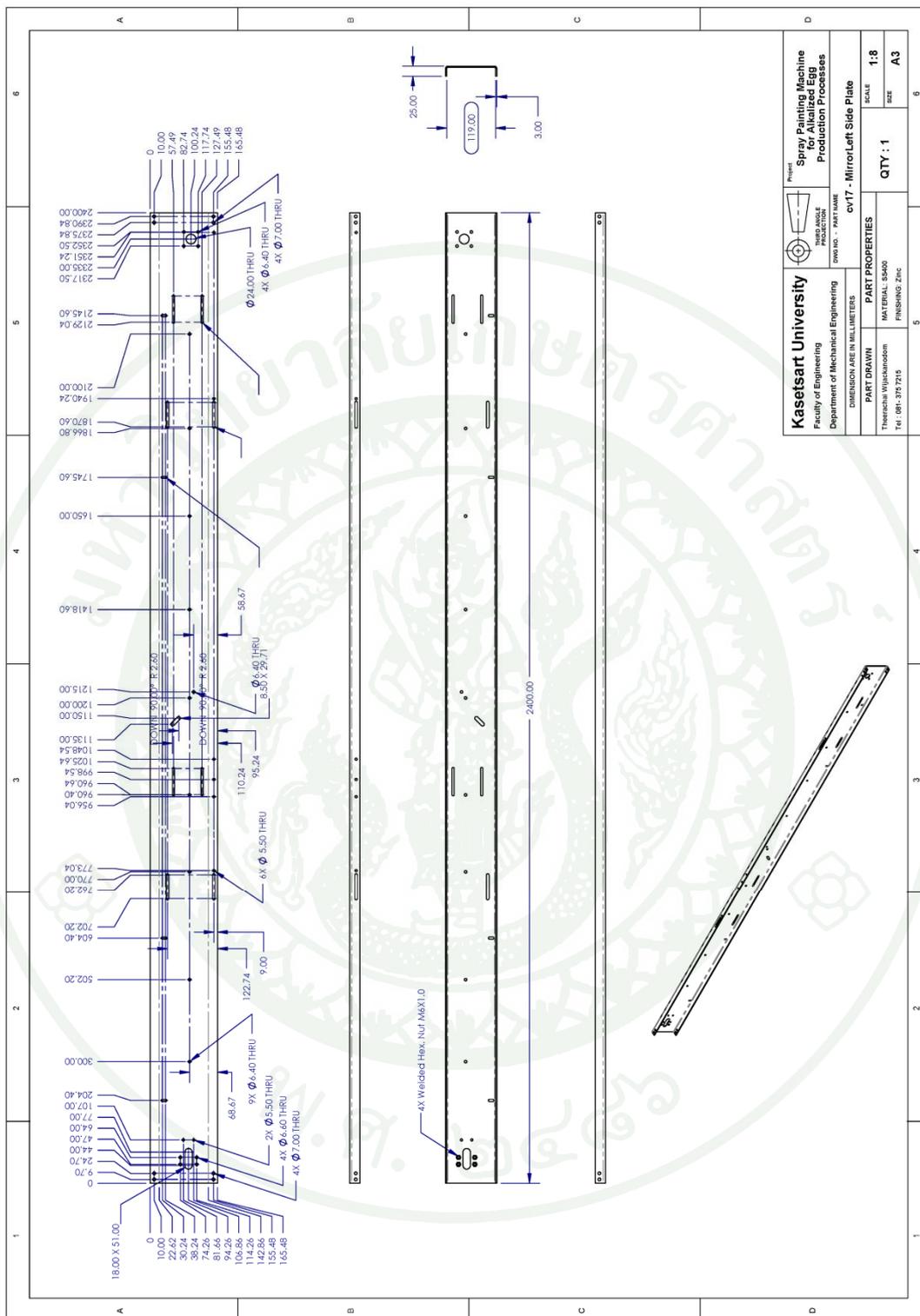
- Back Cover(1)
 - Back Cover(2)
 - Back Cover(3)
 Welded All Together

| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project Spray Painting Machine for Allazed Egg Production Processes |
| | DWS No. - PART NAME cv11 - Back Cover |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |
| PART DRAWN Thirachai Wijitmanodom TEL: 091-3171210 | SCALE 1:5 |
| QTY: 1 | SIZE A3 |

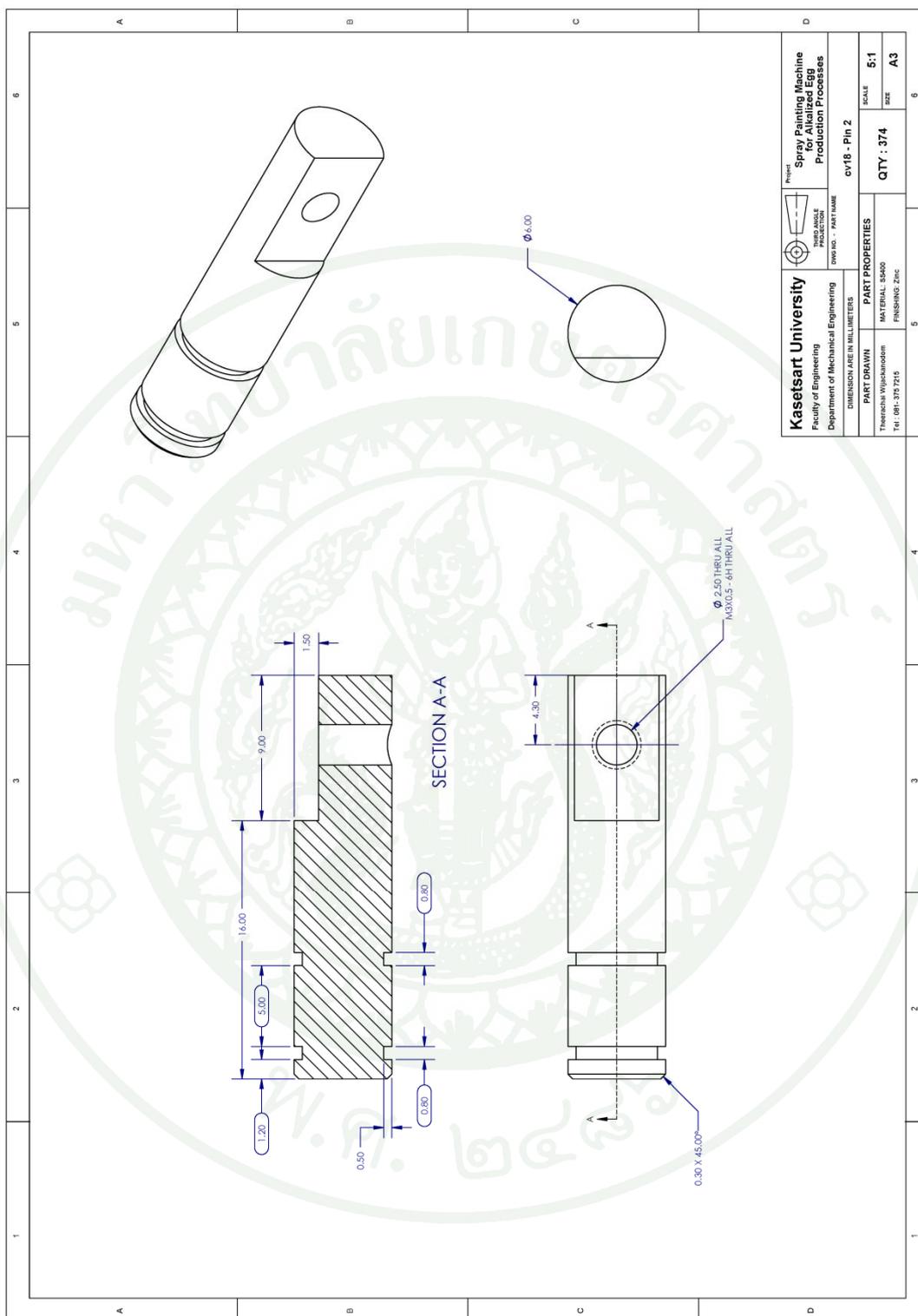


| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes Idle Pin 2 | |
| DWS NO. - PART NAME cv15 - Idle Pin 2 | | QTY : 8 SCALE : 3:1 SIZE : A3 | |
| PART DRAWN Thirachai Kijjanasodorn TEL: 091-3151215 | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | |

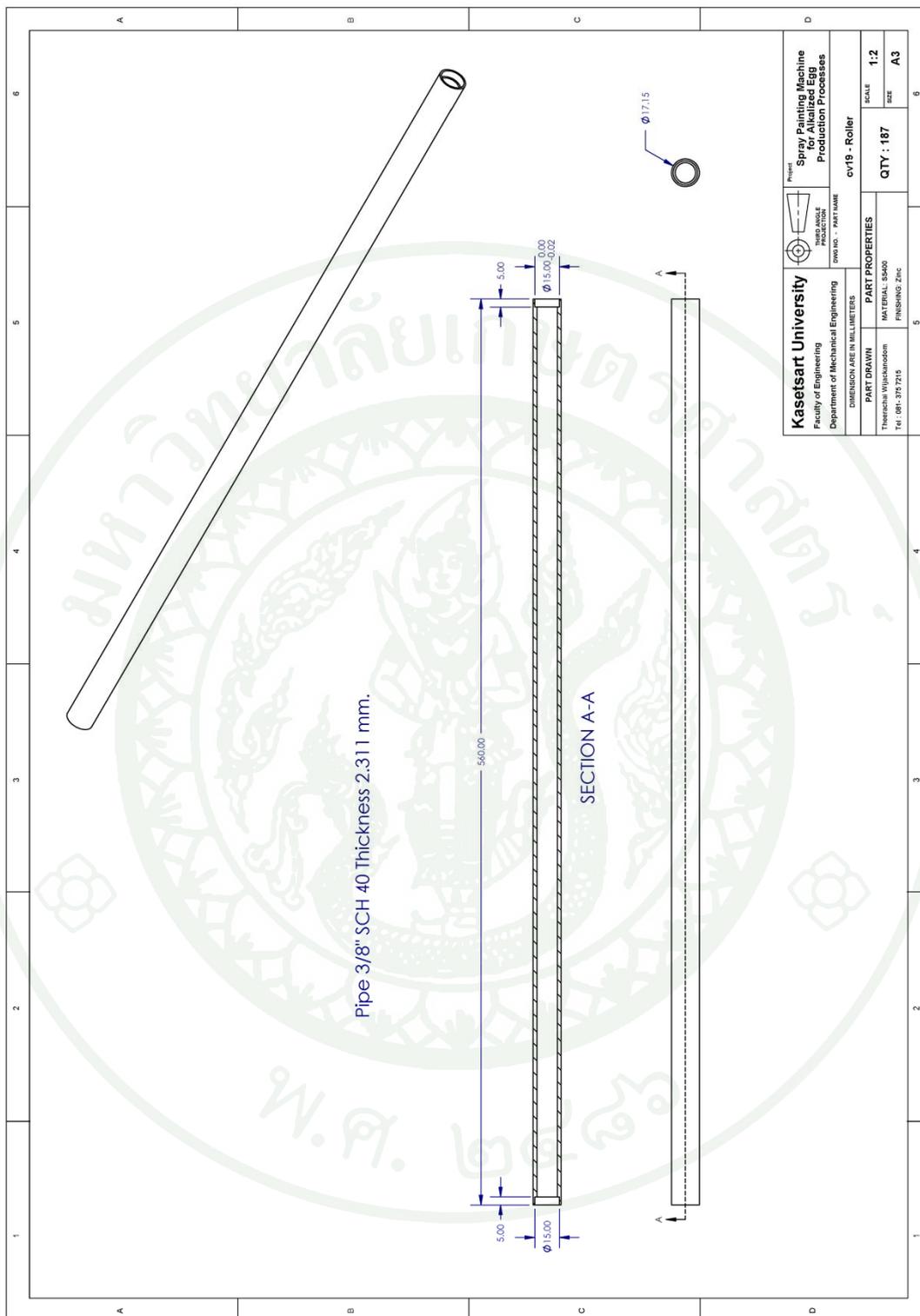




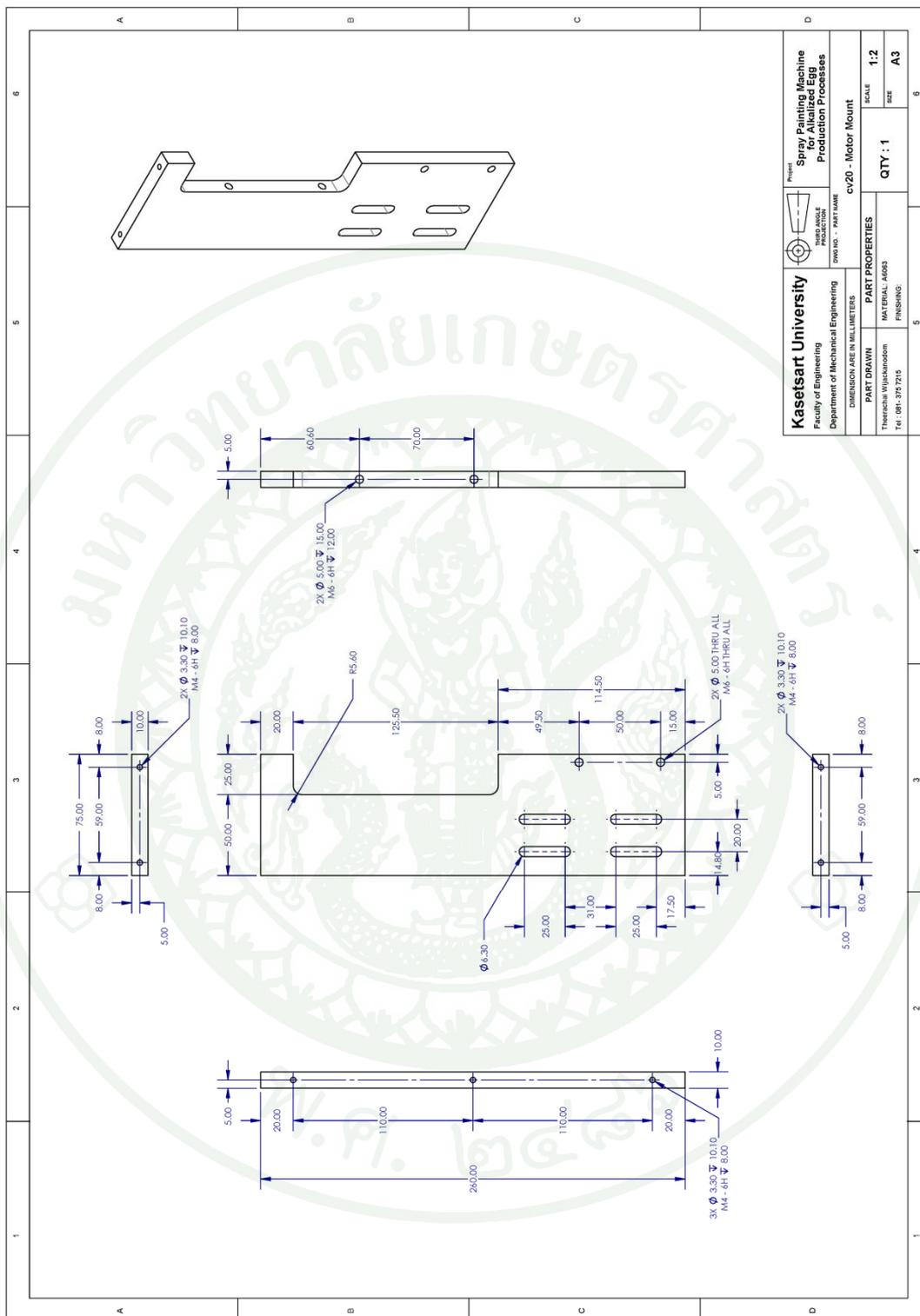
| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes |
| | DWG NO. - PART NAME: cv17 - Mirror/Left Side Plate |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES |
| PART DRAWN: Thirachai Wijitmanodorn TEL: 081-3171210 | MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |
| SCALE: 1:8 | QTY: 1 |
| SIZE: A3 | 6 |



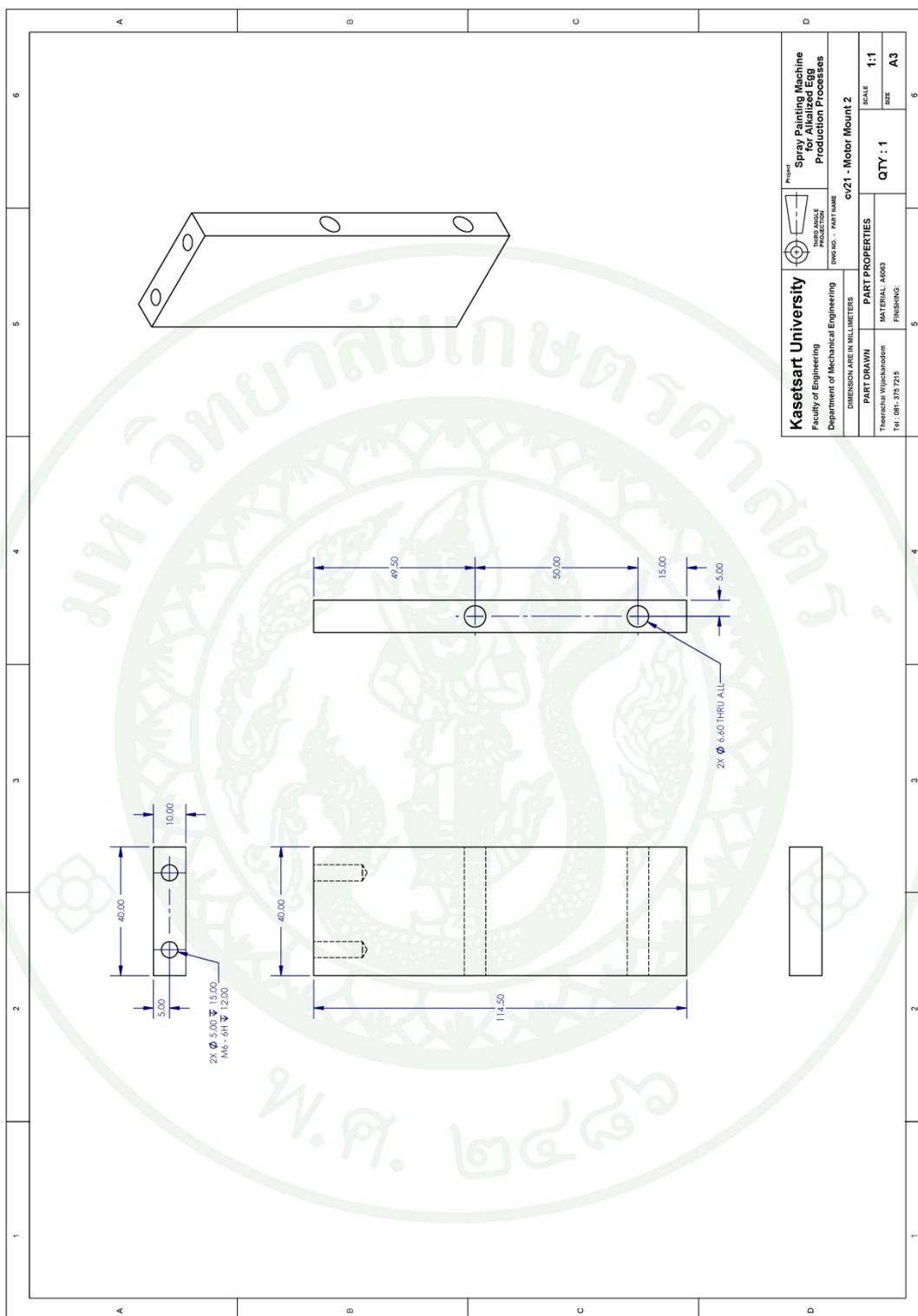
| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes DWG NO. - PART NAME: cv18 - Pin 2 | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES | |
| PART DRAWN: Thirachai Wijitmanodorn TEL: 081-3171210 | | SCALE: 5:1 QTY: 374 SIZE: A3 | |
| MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | | | |

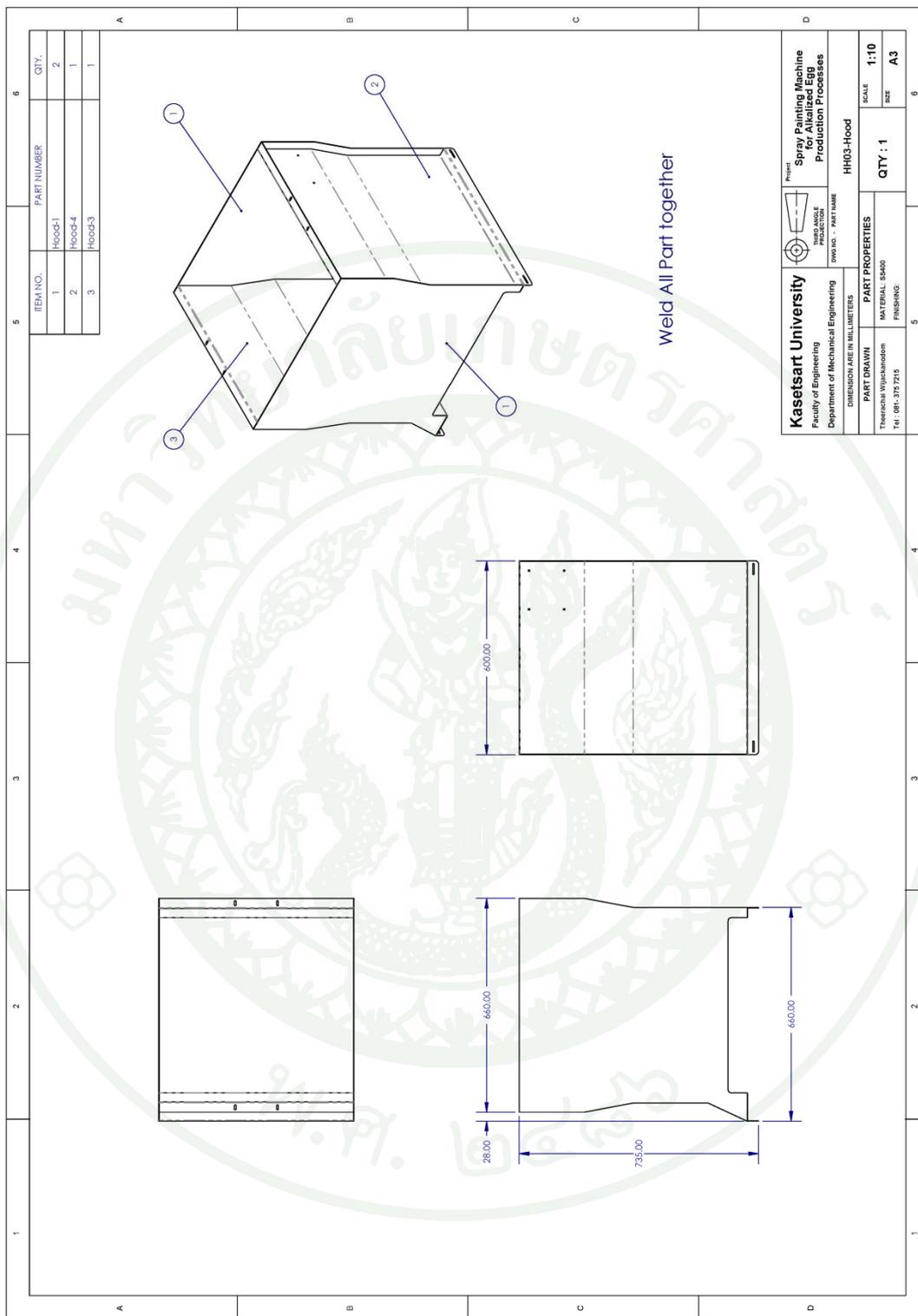


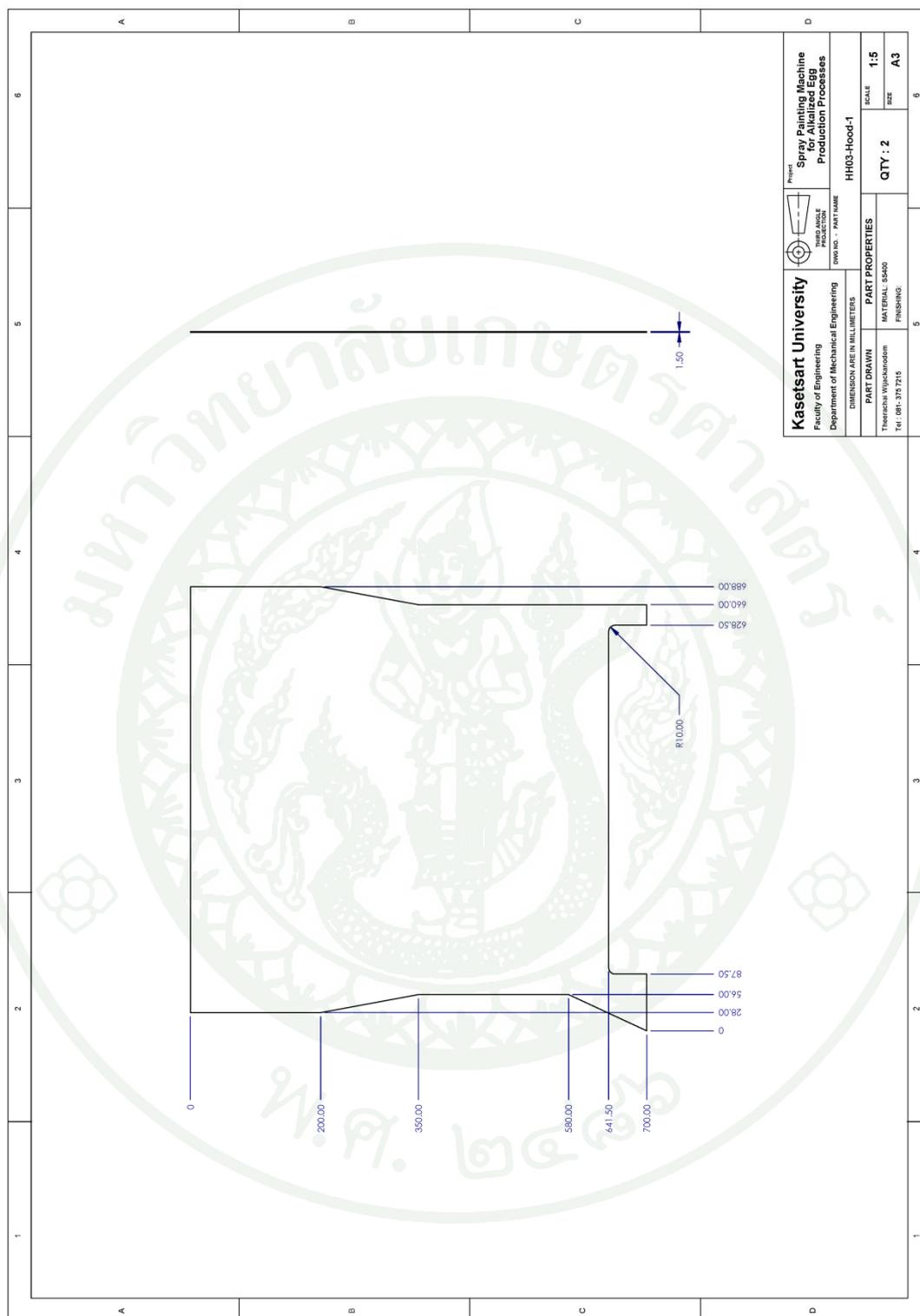
| | |
|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Production Processes cv19 - Roller |
| | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS Dwg. No. - PART NAME |
| PART DRAWN Thirachai Wijiamadorn TEL: 091-3157215 | PART PROPERTIES MATERIAL: S460 FINISHING: ZINC |
| SCALE 1:2 | QTY: 187 SIZE A3 |



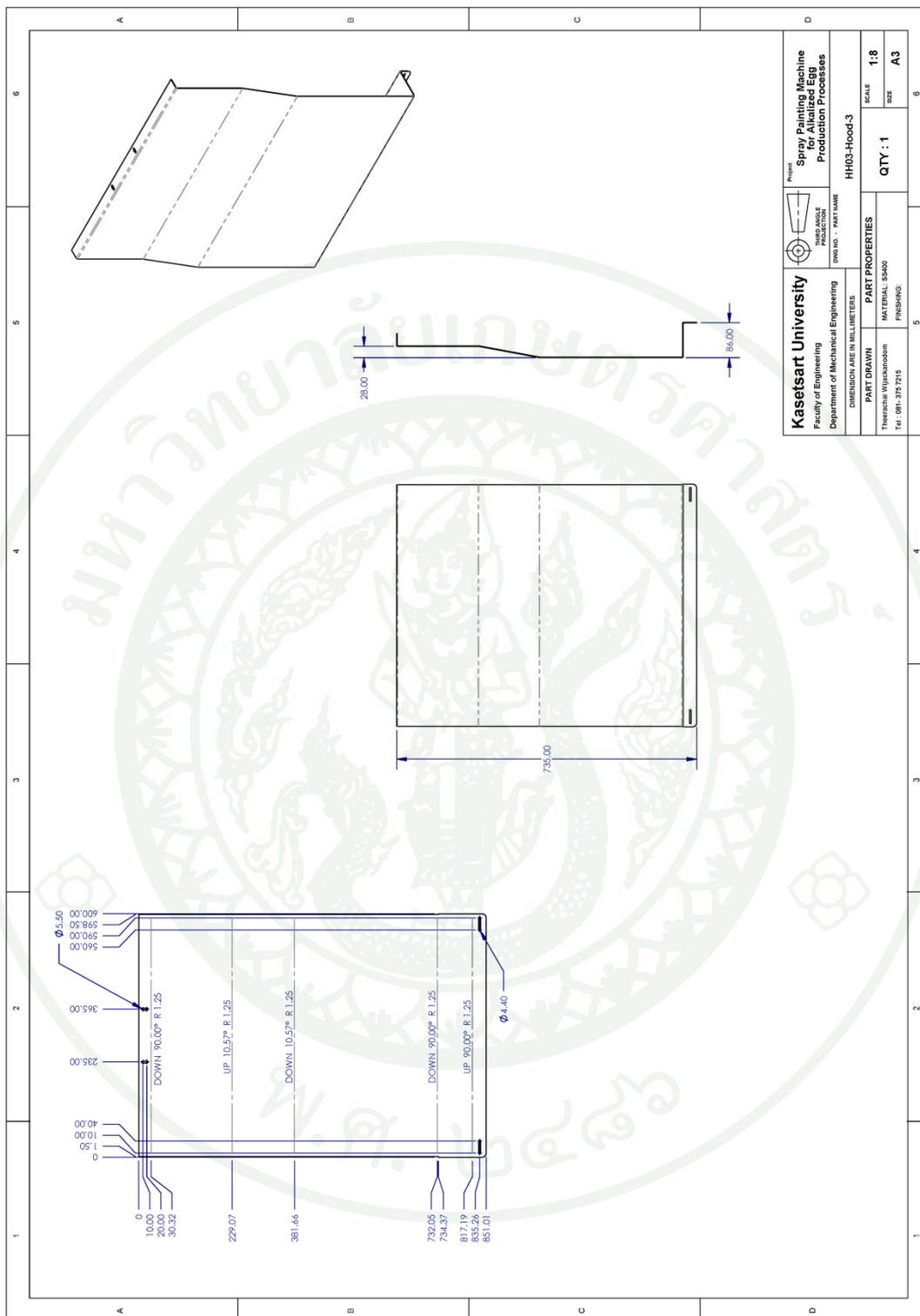
| | | | |
|---|--|---|-------------------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes PRODUCTION DWG NO. - PART NAME cv20 - Motor Mount | |
| PART DRAWN Theerachai Wijiamadorn TEL: 091-317216 | | PART PROPERTIES MATERIAL: A6063 FINISHING: | |
| | | SCALE 1:2 | SIZE A3 |
| | | QTY: 1 | |



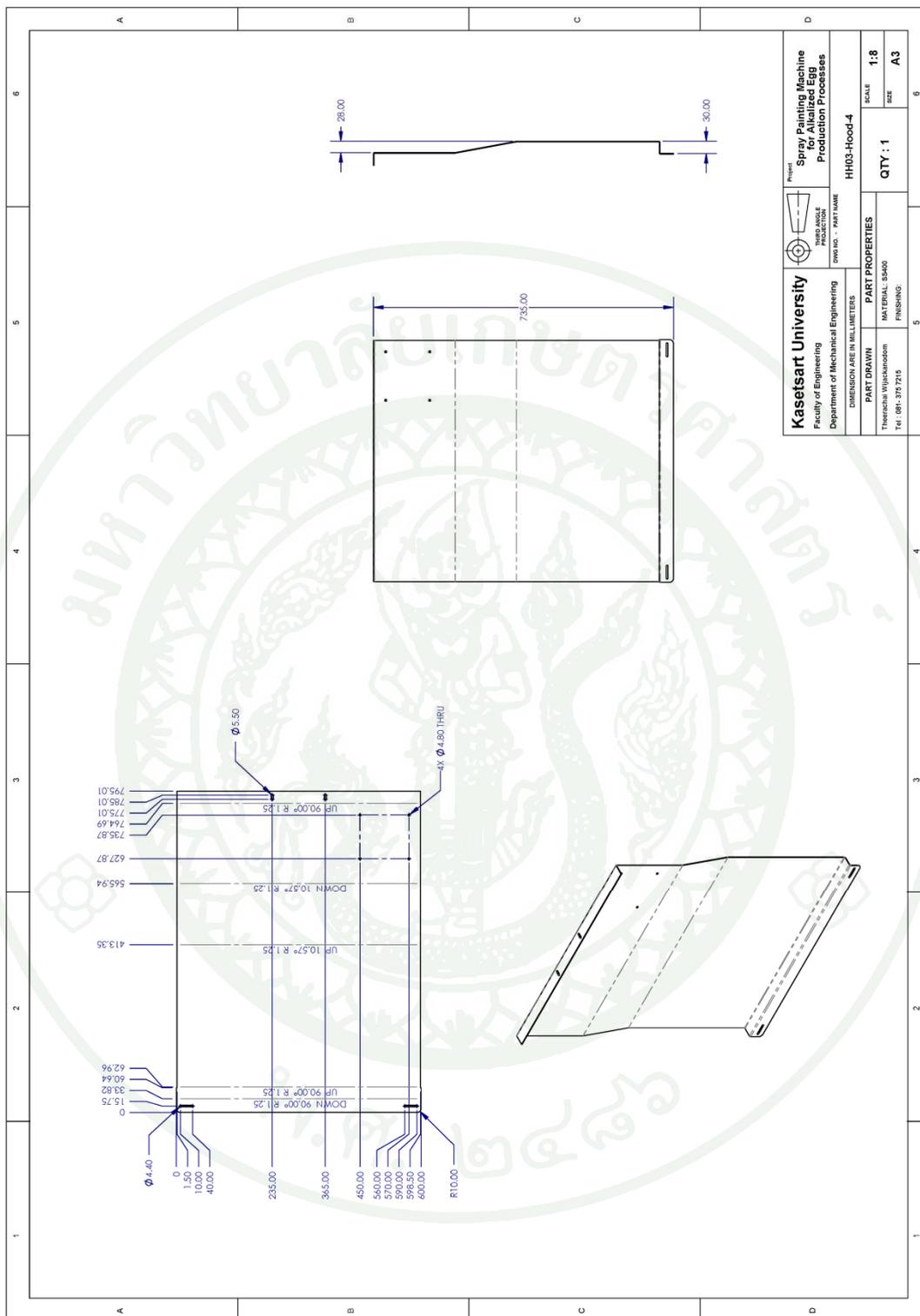


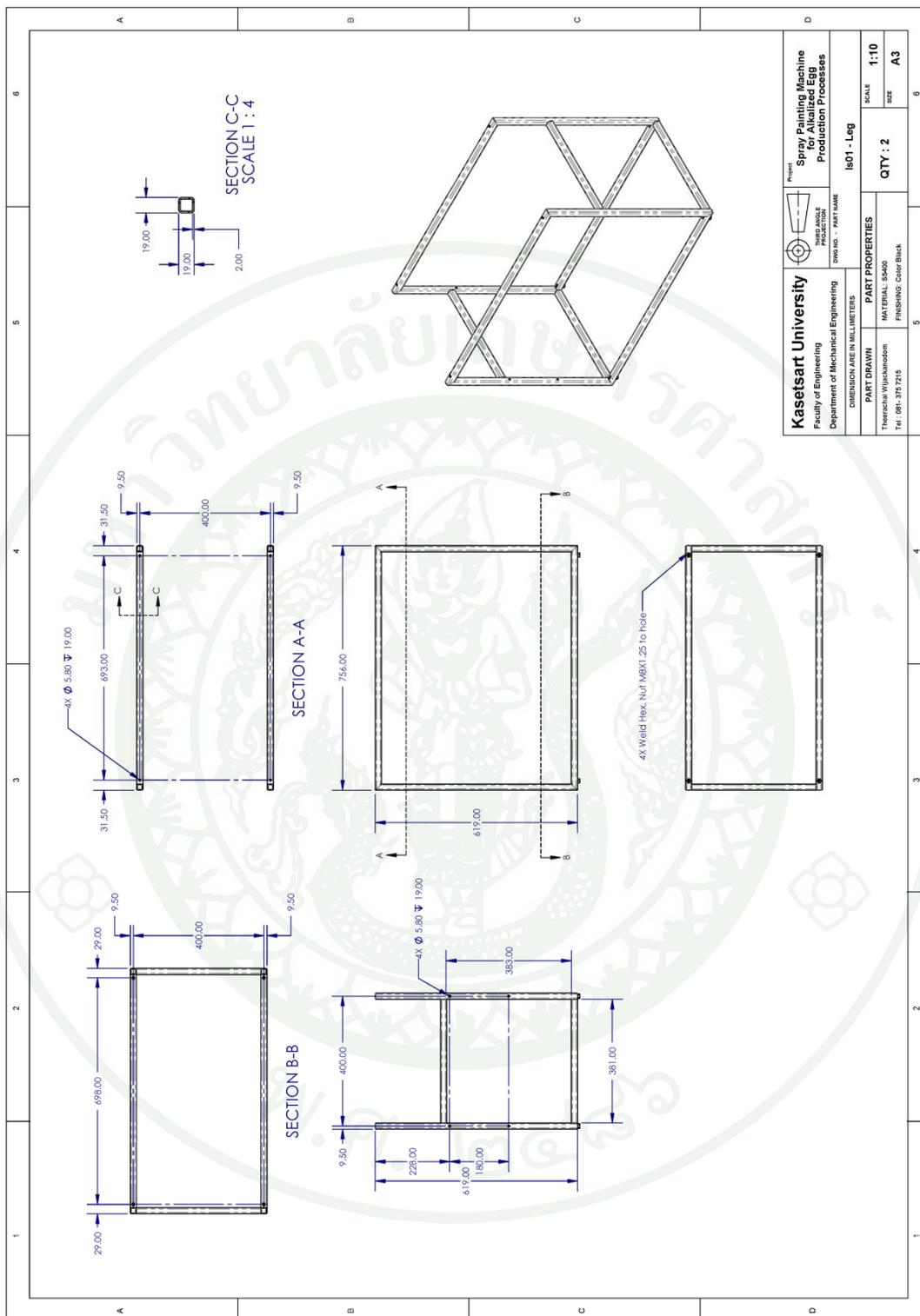


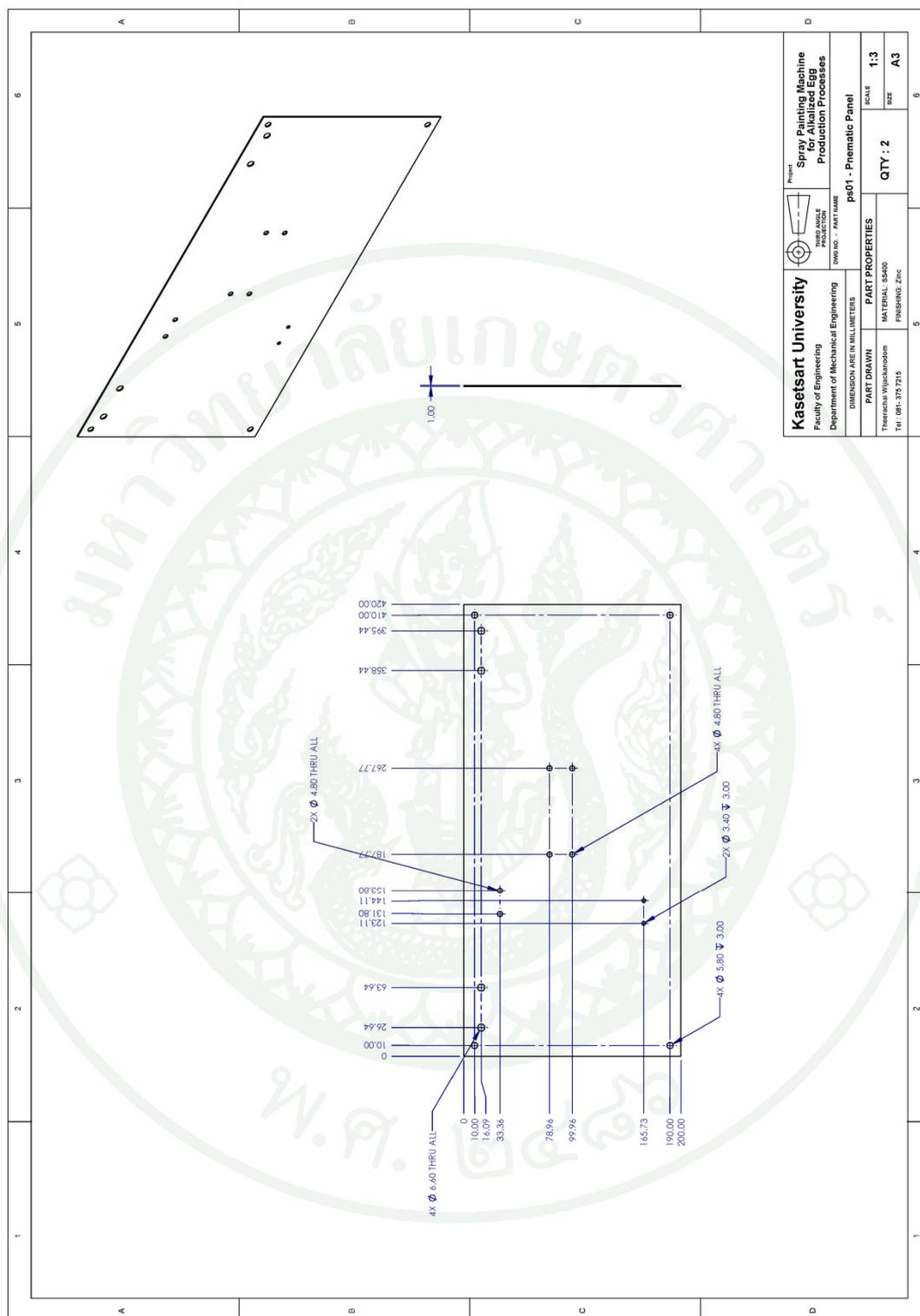
| | | |
|---|--|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Production Process DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | Project Spray Painting Machine for Allazed Egg Production Processes HW03-Hood-1 |
| | Dwg. No. - PART NAME HW03-Hood-1 | Scale 1:5 |
| Part Drawn Thirachai Rajasamudom TEL: 091-3151215 | Part Properties MATERIAL: S45C FINISH: | Qty: 2 Size: A3 |

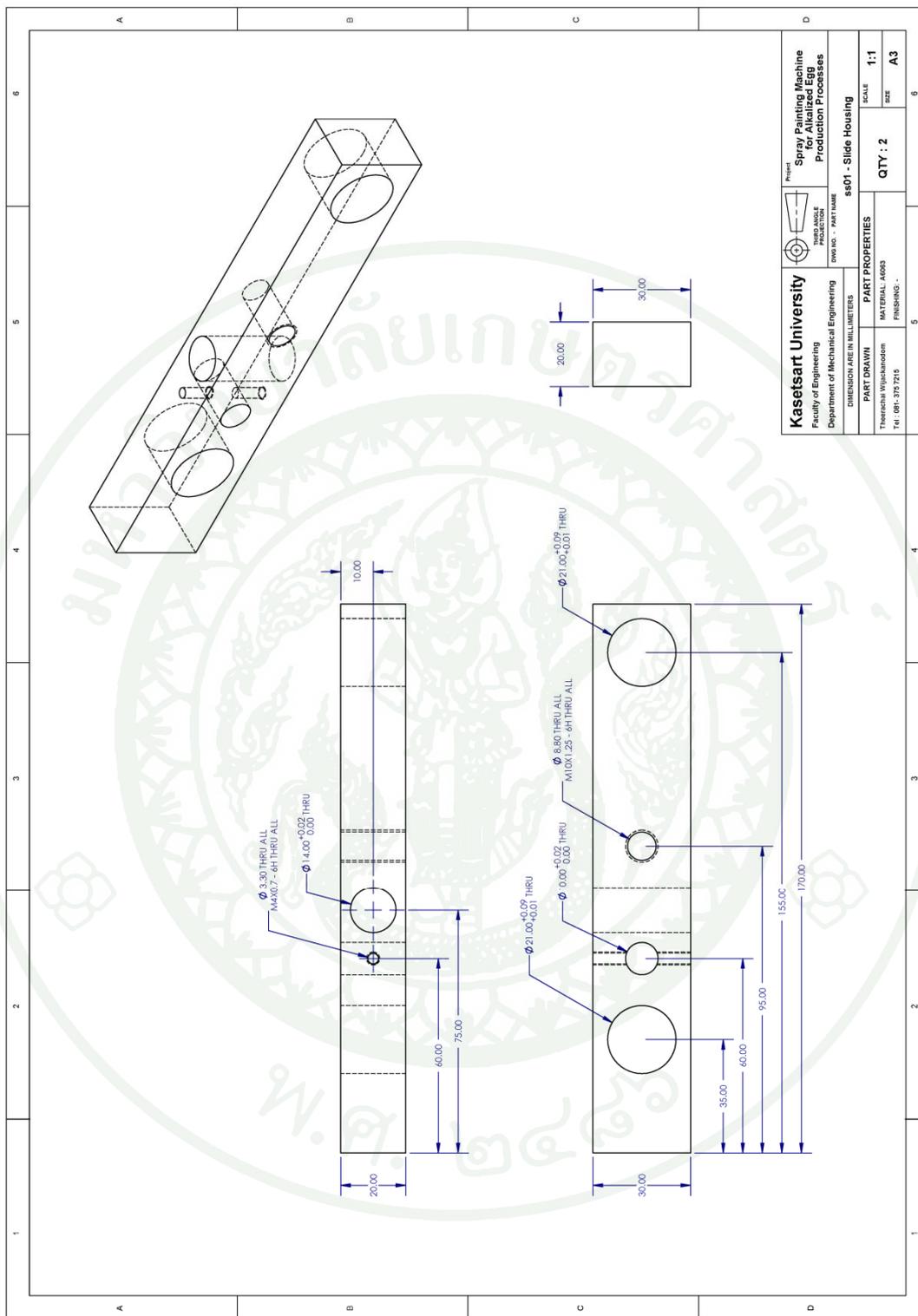


| | | | |
|---|--|--|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes Part Name: HH03-Hood-3 | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | QTY : 1 | |
| PART DRAWN Theerachai Wijitmanodom TEL: 091-3171210 | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: | |
| SCALE: 1:8 | | SIZE: A3 | |

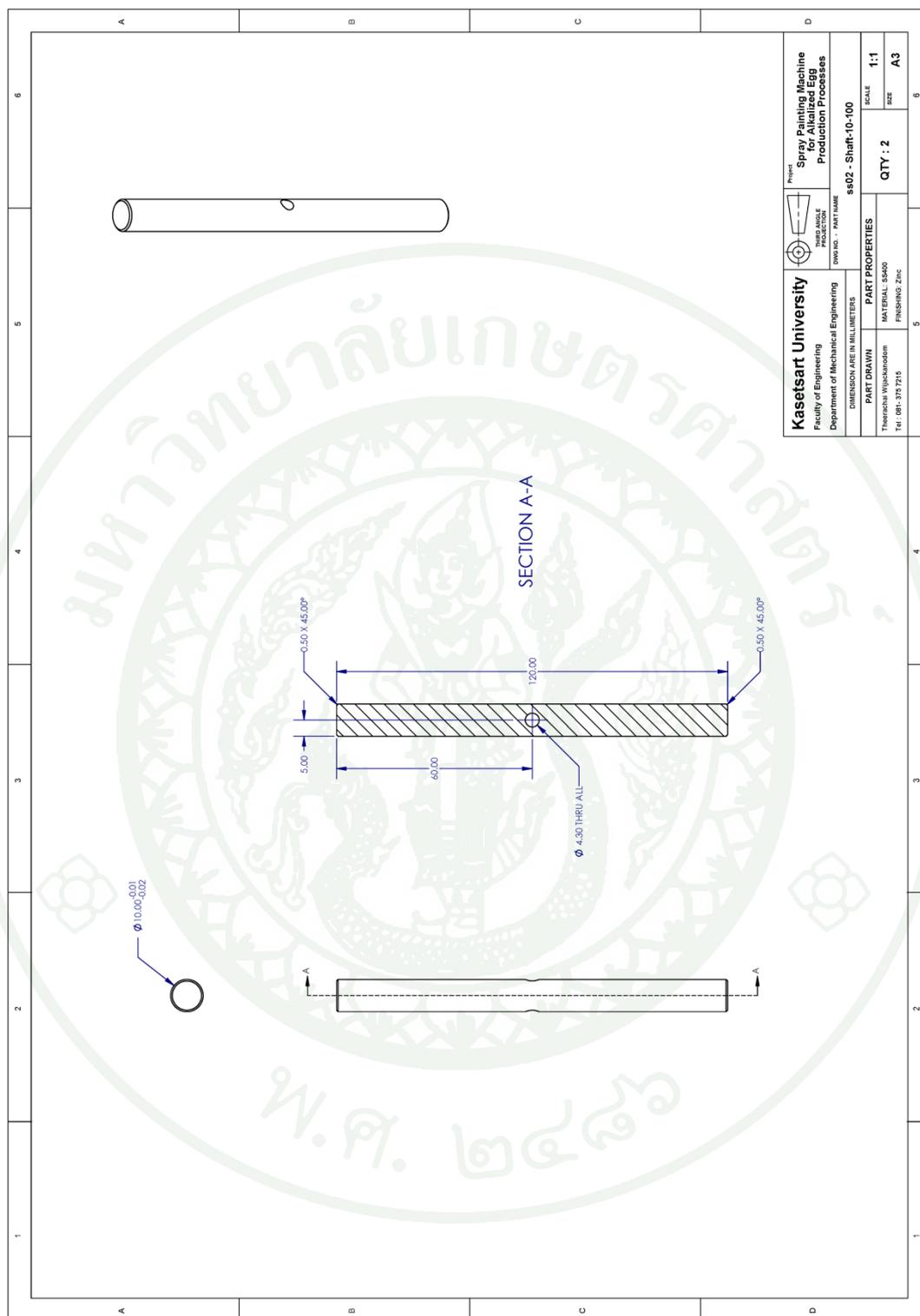




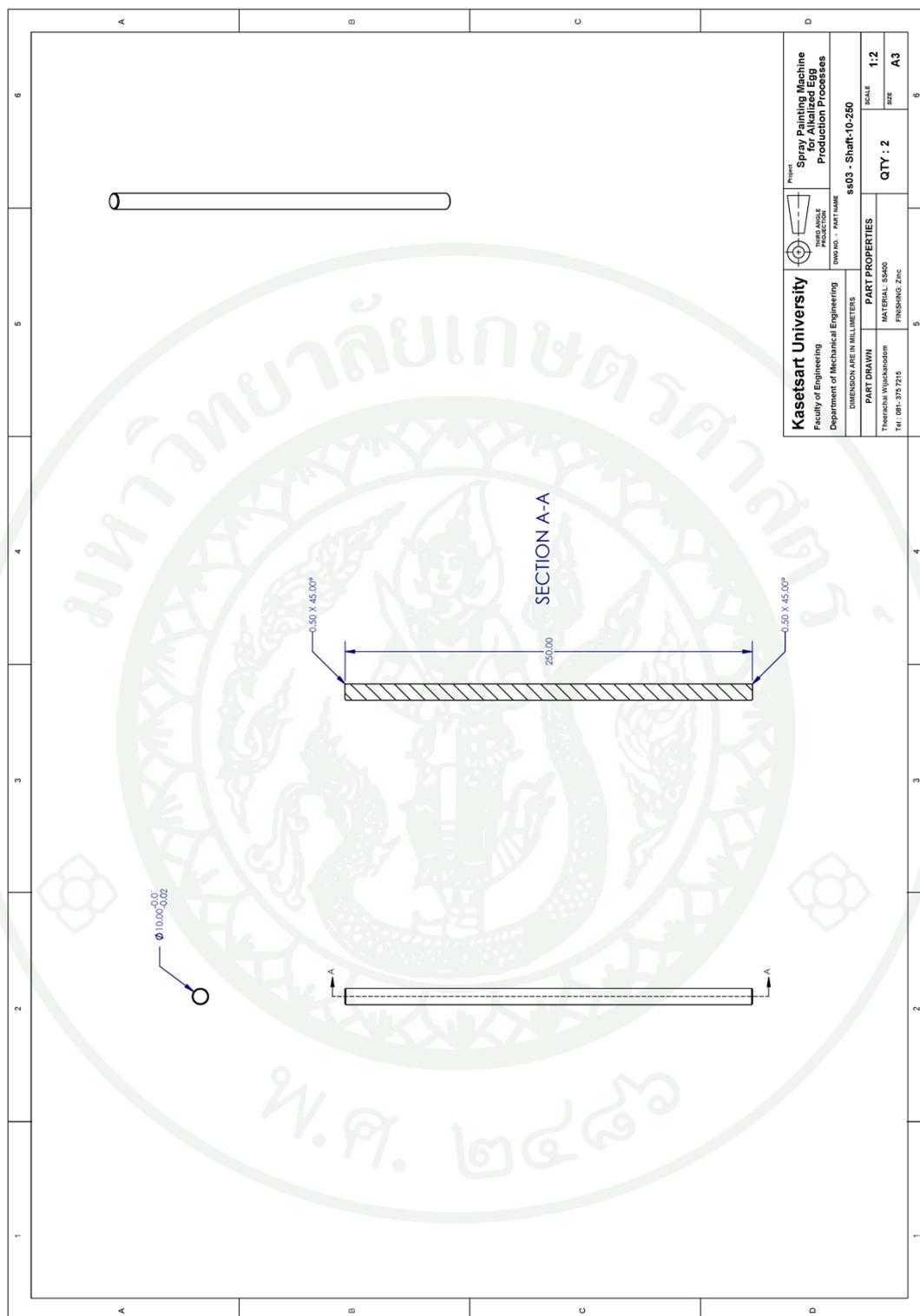




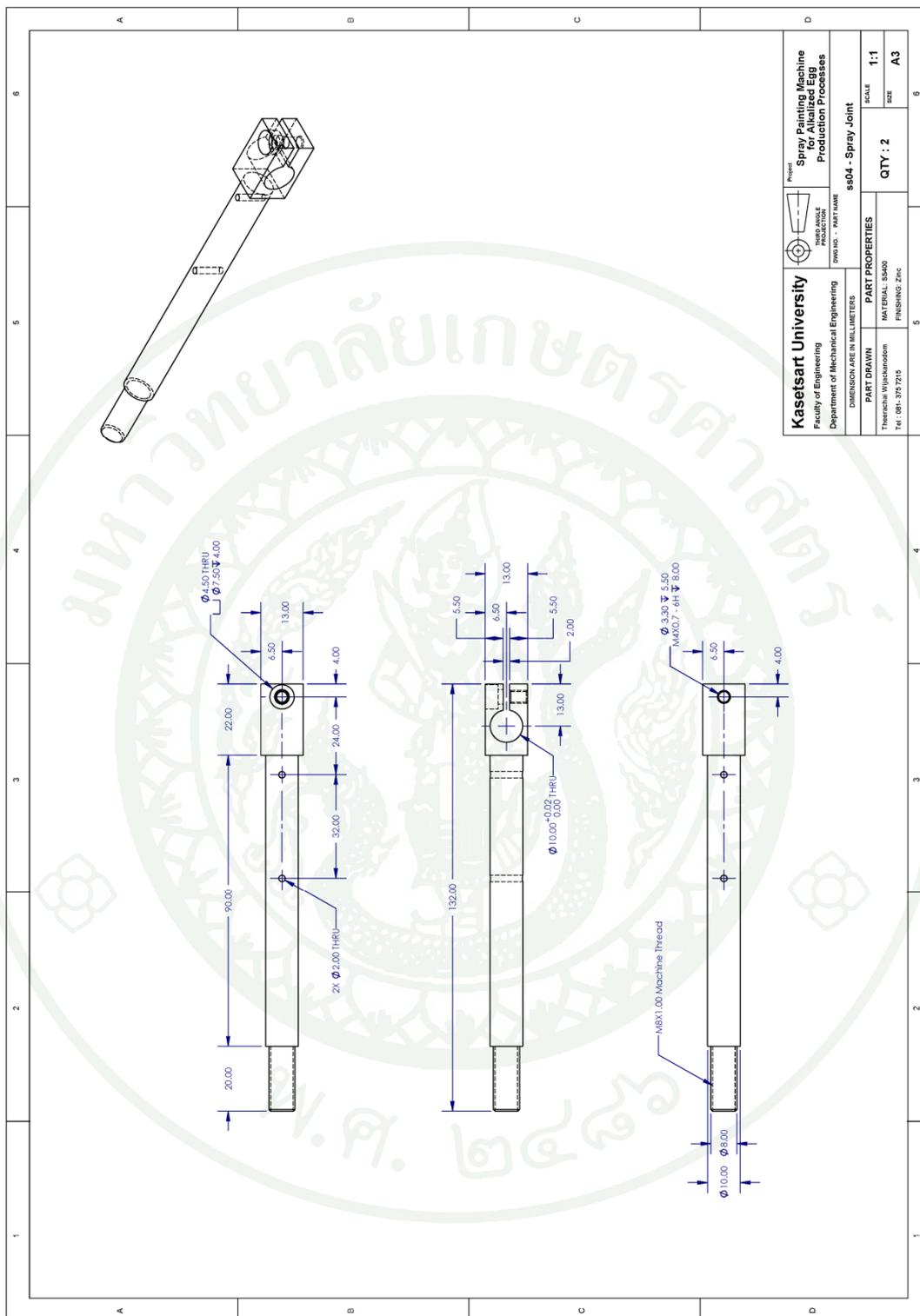
| | | |
|--|--|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | Production Process sso01 - Slide Housing | Project Spray Painting Machine for Allazed Egg Production Processes |
| | | |
| PART DRAWN Thirachai Wijakarnadorn TEL: 081-3157216 | PART PROPERTIES MATERIAL: A6063 FINISHING: - | SCALE 1:1 |
| QTY: 2 | | SIZE A3 |



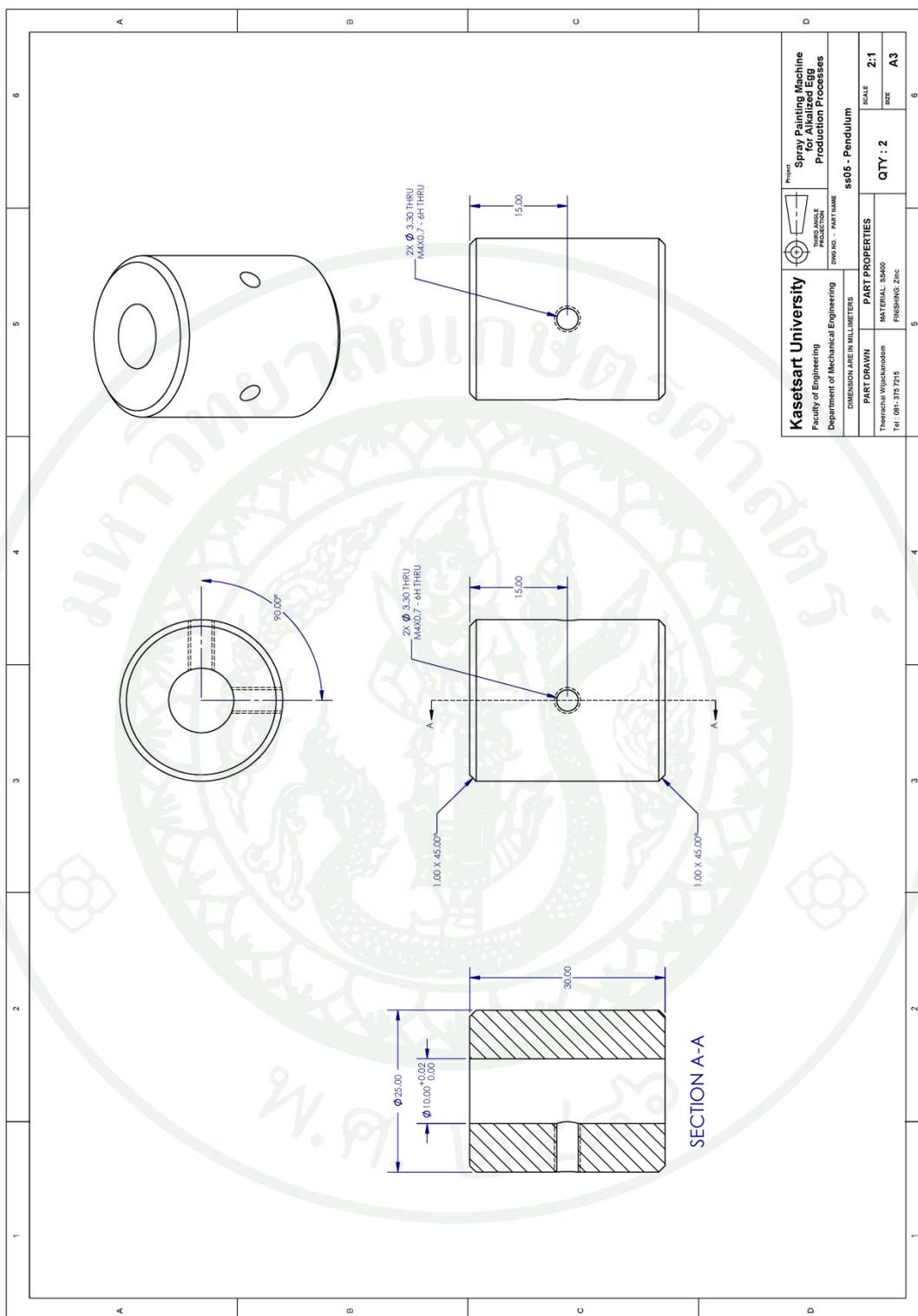
| | | | |
|---|---|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | DWS NO. - PART NAME ss602 - Shaft-10-100 | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |
| | | | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS PART DRAWN Thirachai Wijakarnadorn TEL: 091-3171210 | PART PROPERTIES MATERIAL: S602 FINISH: ZINC | QTY: 2 SCALE: 1:1 SIZE: A3 | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |



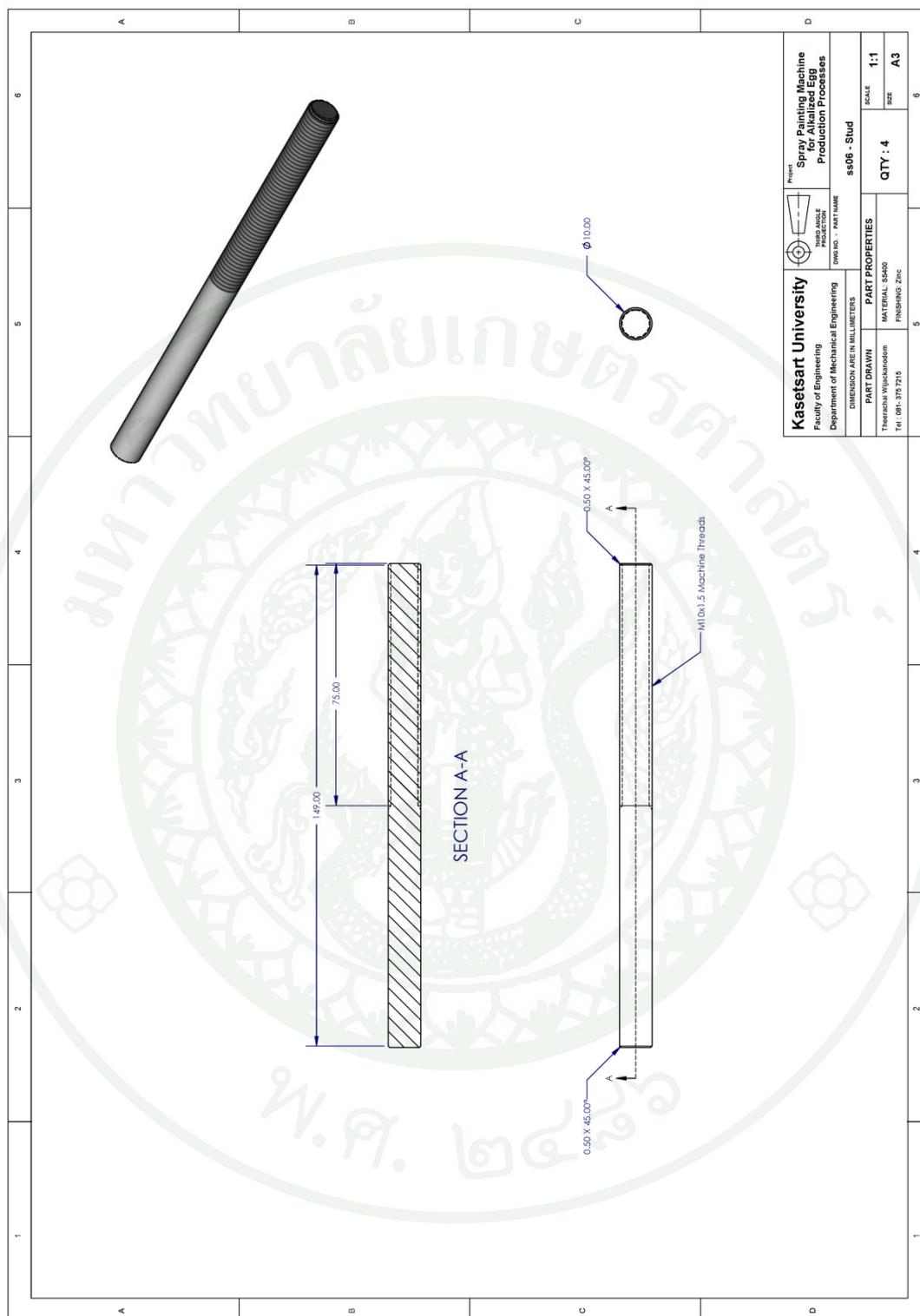
| | | |
|---|--|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | Production Process ss603 - Shaft-10-250 | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |
| | | QTY: 2 SCALE: 1:2 SIZE: A3 |
| PART DRAWN Thirachai Wijitkarnadorn TEL: 091-3151210 | PART PROPERTIES MATERIAL: S660 FINISHING: ZINC | DIMENSIONS 250.00 10.00 0.50 |



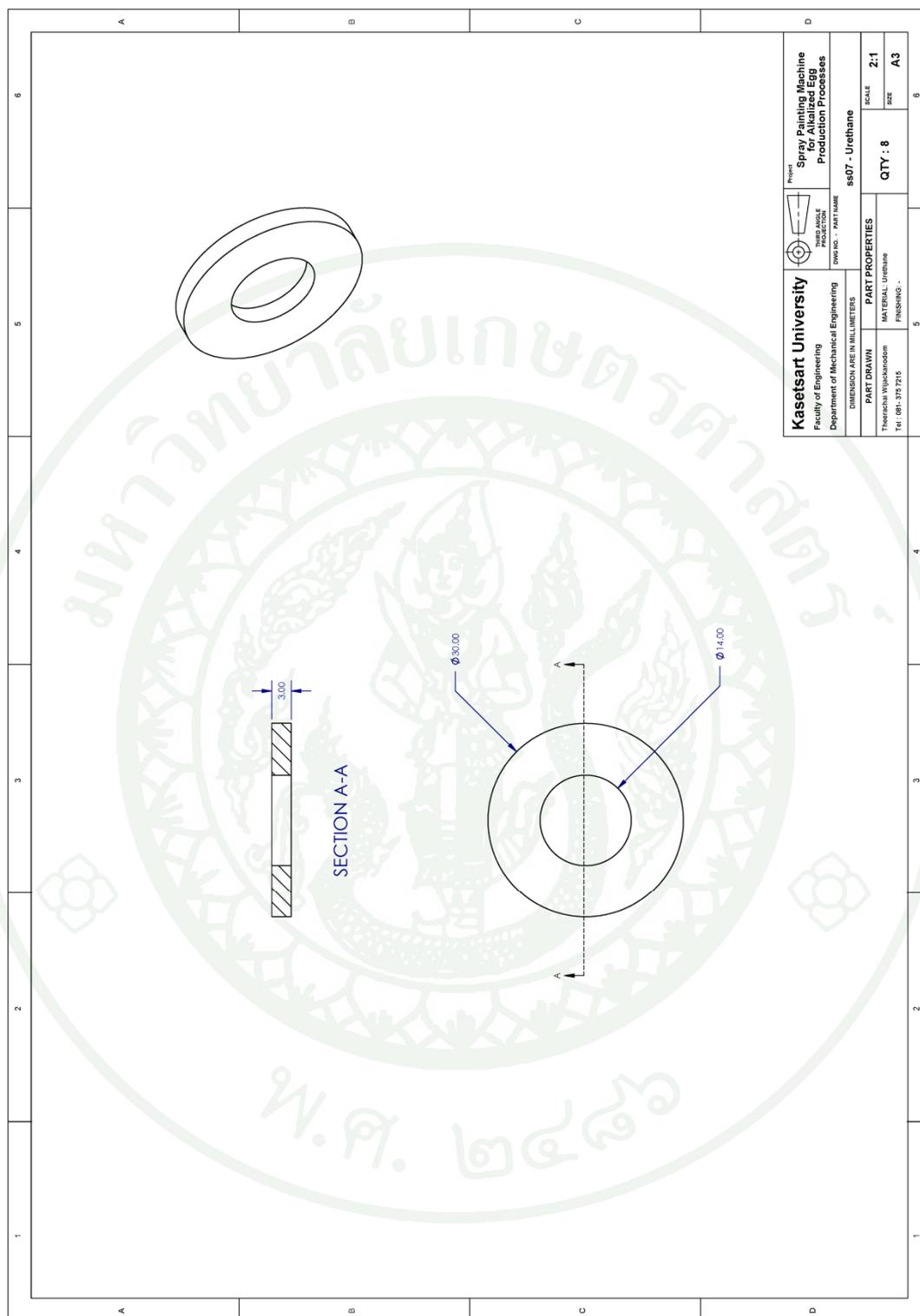
| | | | |
|--|---|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | PROJECT Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes | DWG. NO. - PART NAME ss04 - Spray Joint | SCALE 1:1 |
| | PART DRAWN Thirachai Wijitkarnsorn TEL: 091-317210 | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |



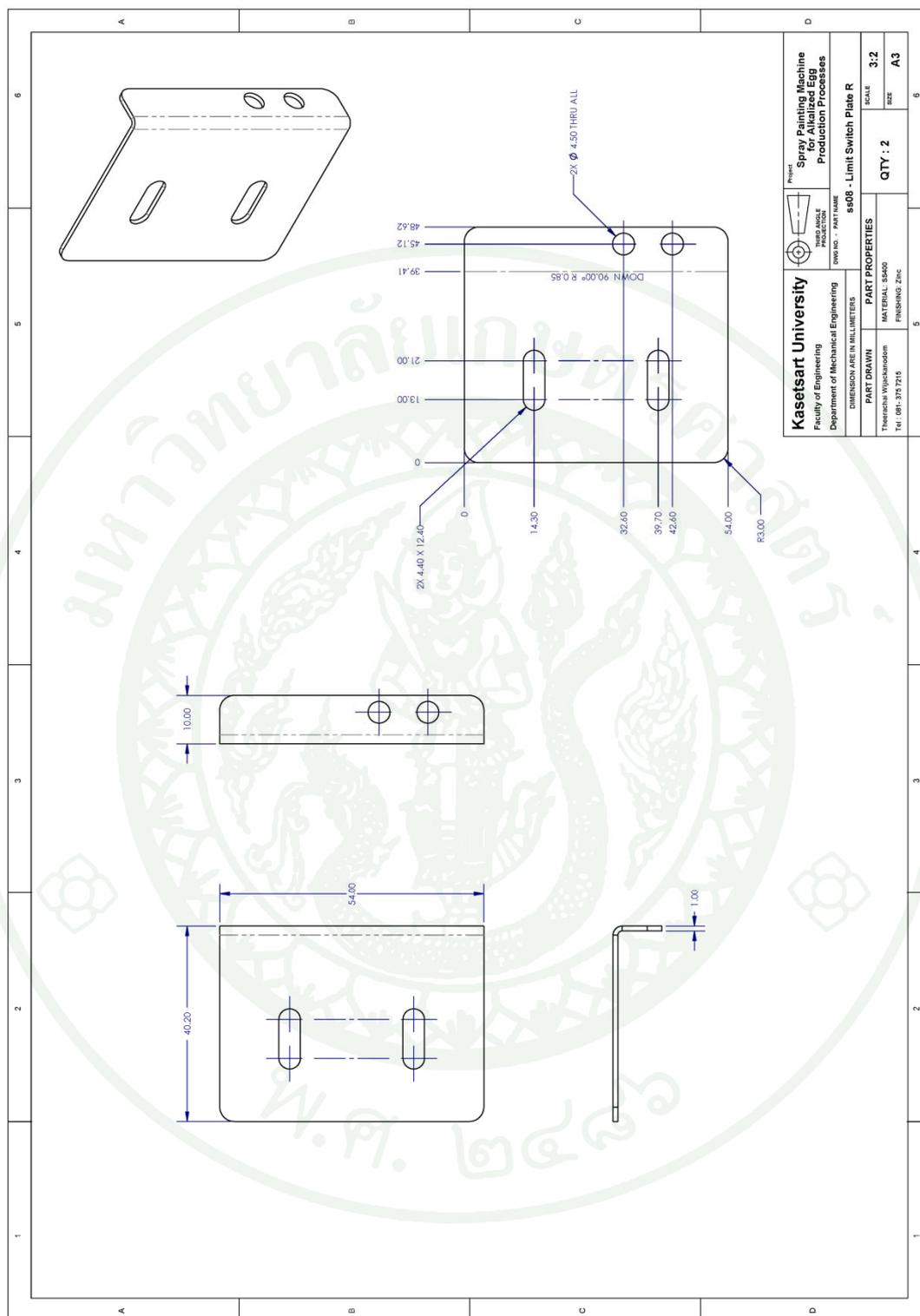
| | |
|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes |
| | DWG. NO. - PART NAME s605 - Pendulum |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES MATERIAL: S600 FINISHING: ZINC |
| PART DRAWN Thirachai Wijitkarnadorn TEL: 091-3151215 | SCALE 2:1 |
| QTY: 2 | SIZE A3 |

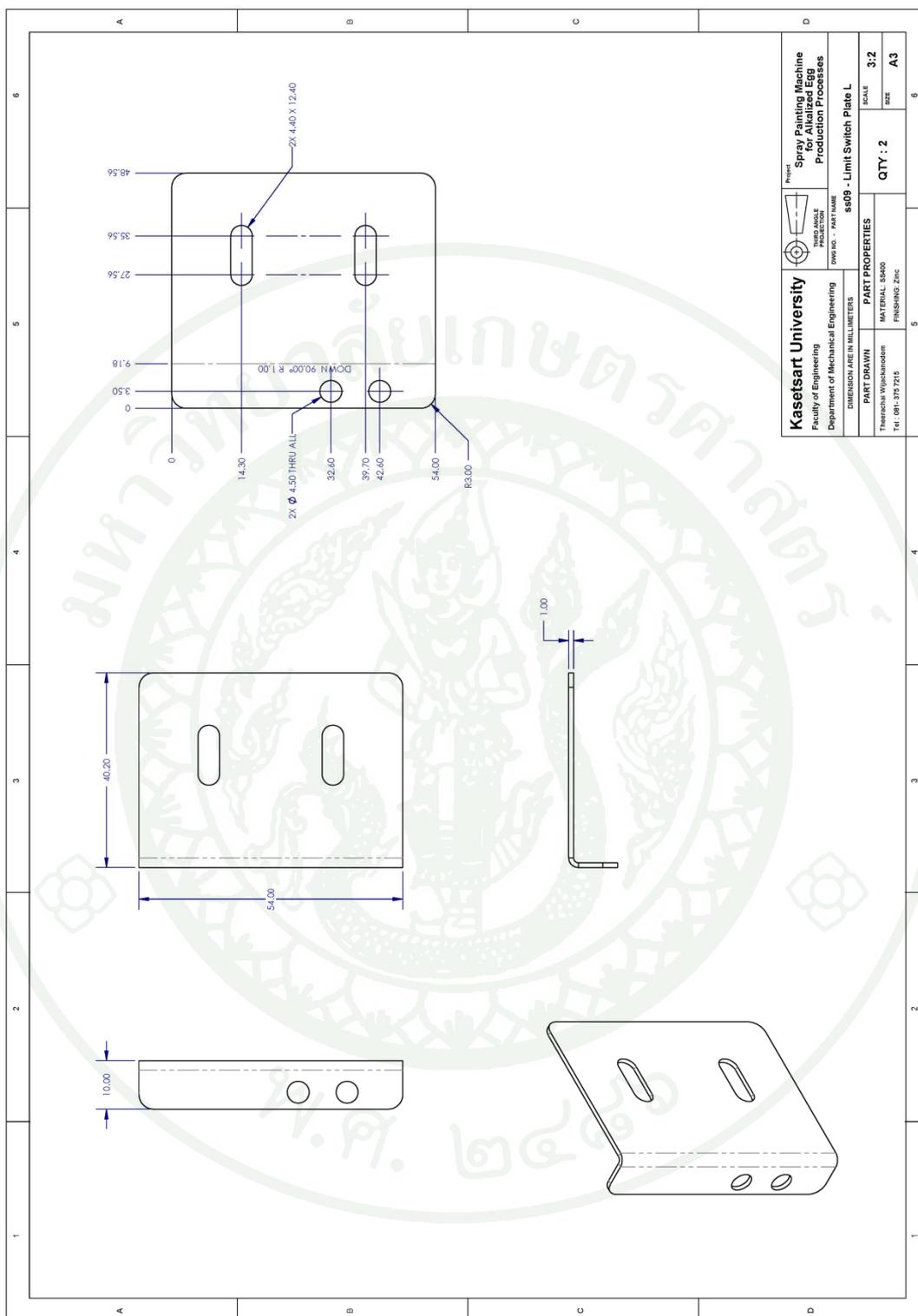


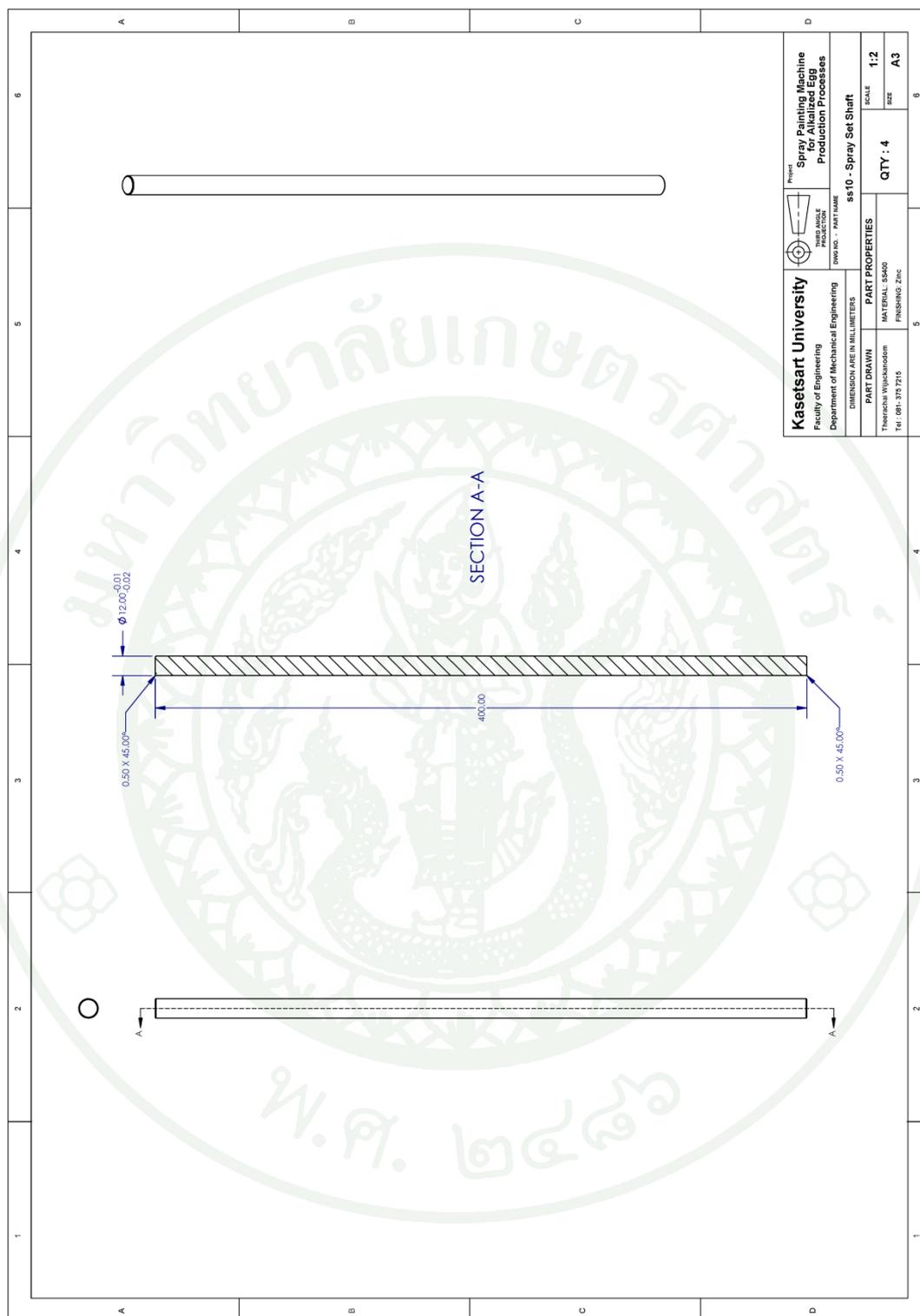
| | | | |
|--|--|--|--------------------------------------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | Project: Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes DRAWING NO. - PART NAME: ss06 - Stud | |
| DRAWN BY: Thirachai Wijiamadorn TEL: 081-317210 | PART PROPERTIES MATERIAL: S304 FINISHING: Zn | QTY: 4 | SCALE: 1:1 SIZE: A3 |



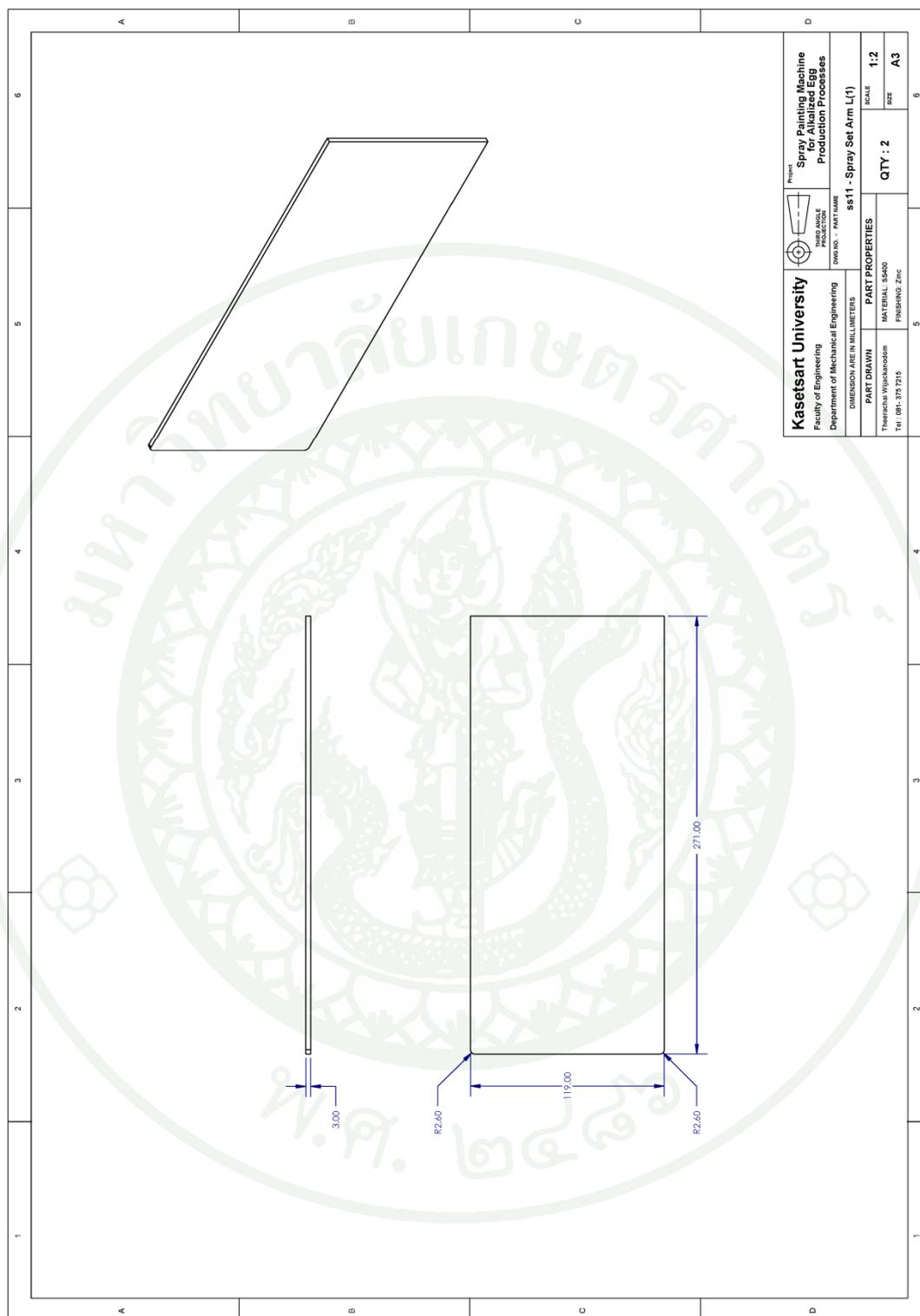
| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes Dwg. No. - PART NAME: ss07 - Urethane | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES MATERIAL: Urethane FINISHING: - | |
| PART DRAWN Theerachai Rajakhamdom TEL: 081-3157210 | | SCALE: 2:1 QTY: 8 SIZE: A3 | |

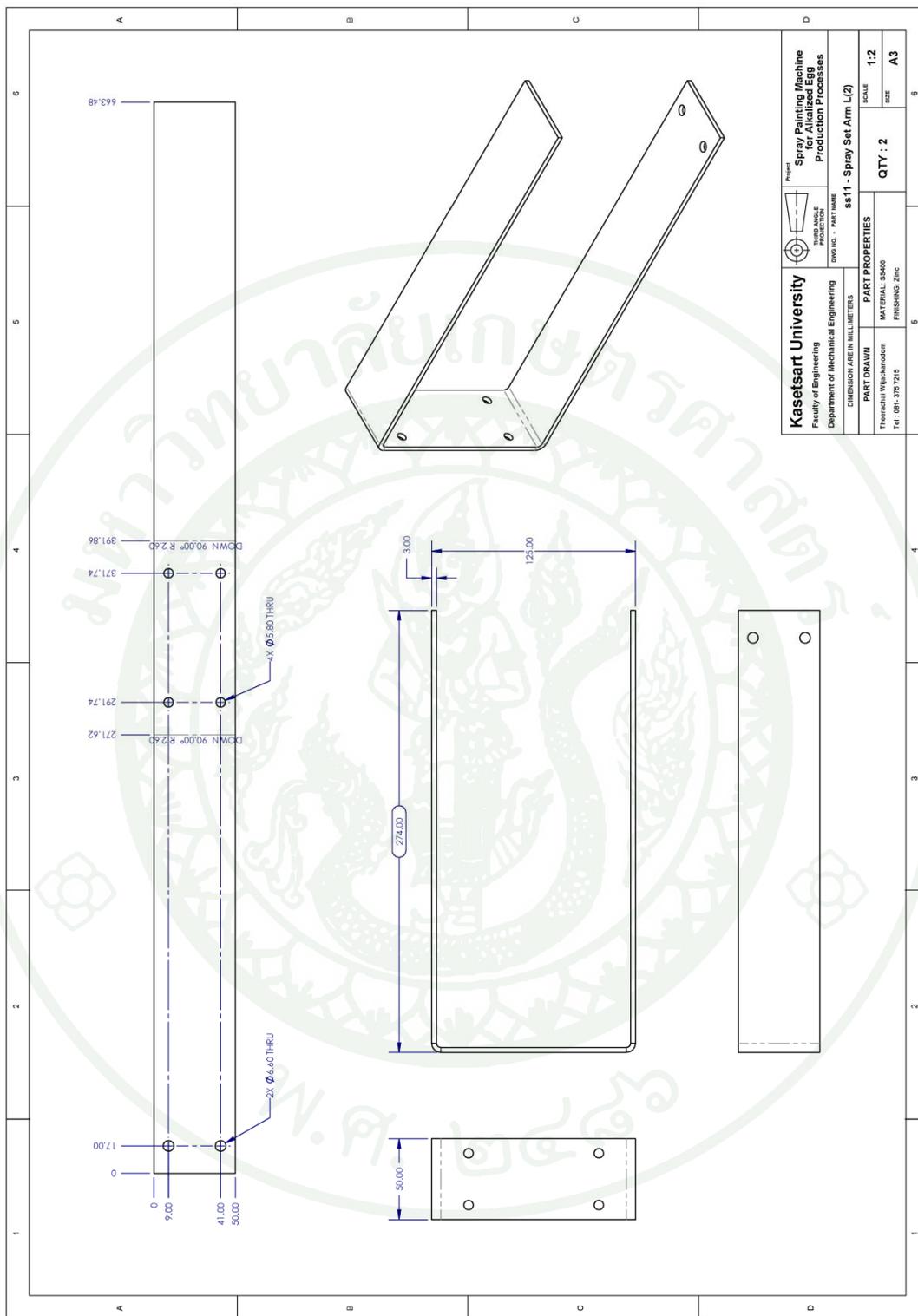


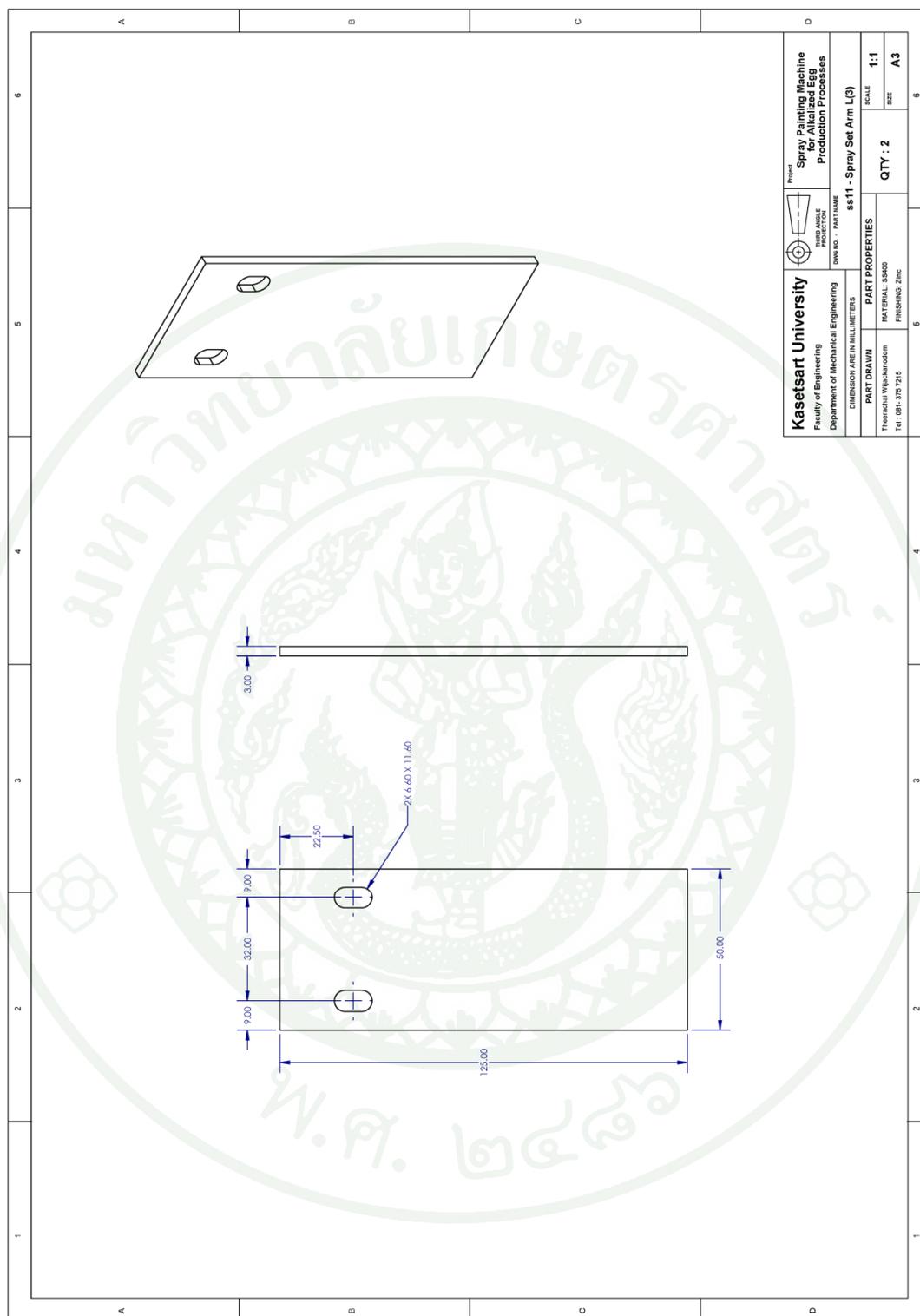




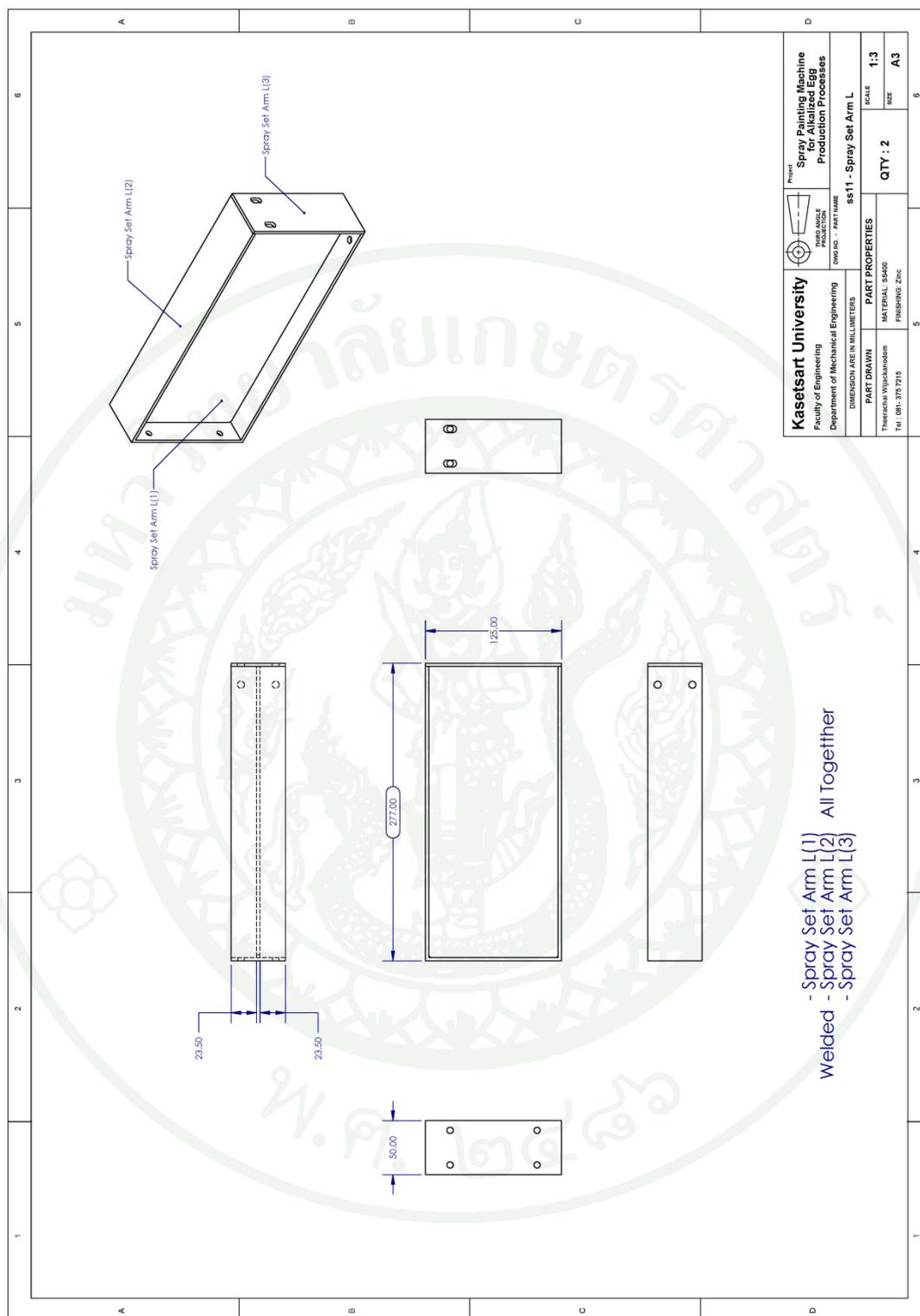
| | | | | | |
|---|--|---|--|--------------------------------|------------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes | DWG NO. - PART NAME ss10 - Spray Set Shaft | SCALE | 1:2 |
| | | | | QTY : 4 | SIZE A3 |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES | | MATERIAL: S45C FINISH: ZINC | |
| PART DRAWN Theerachai Wijitkhamdom TEL: 091-317210 | | PART PROPERTIES | | QTY : 4 SIZE A3 | |





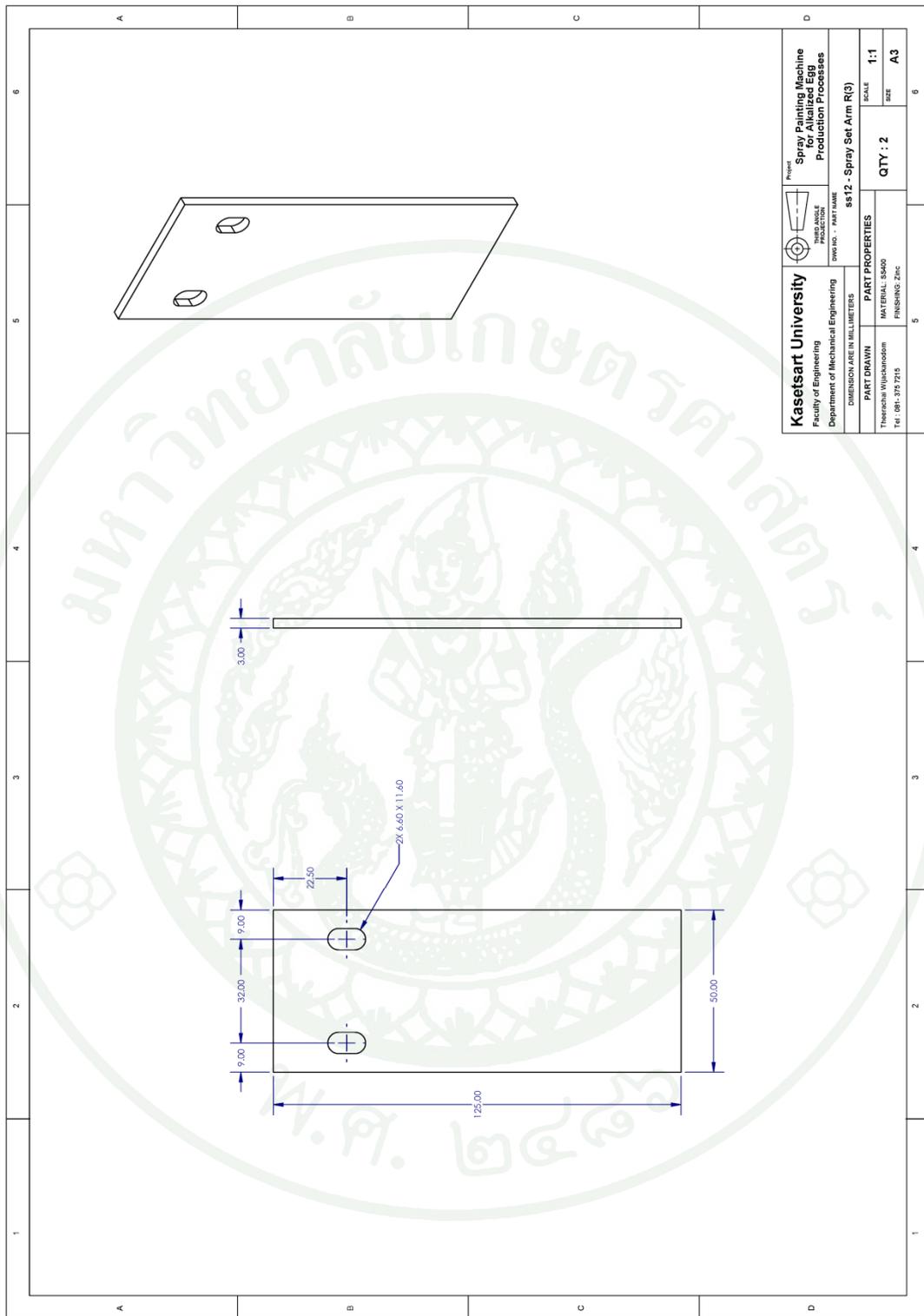


| | | | | | | |
|---|---|---|--|-----------------|---------------------|-------------------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | PRODUCTION DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | Project Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes | Dwg. No. - PART NAME ss11 - Spray Set Arm L(3) | QTY: 2 | SCALE 1:1 | SIZE A3 |
| | | | | PART PROPERTIES | | |
| MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | | | | PART PROPERTIES | | |

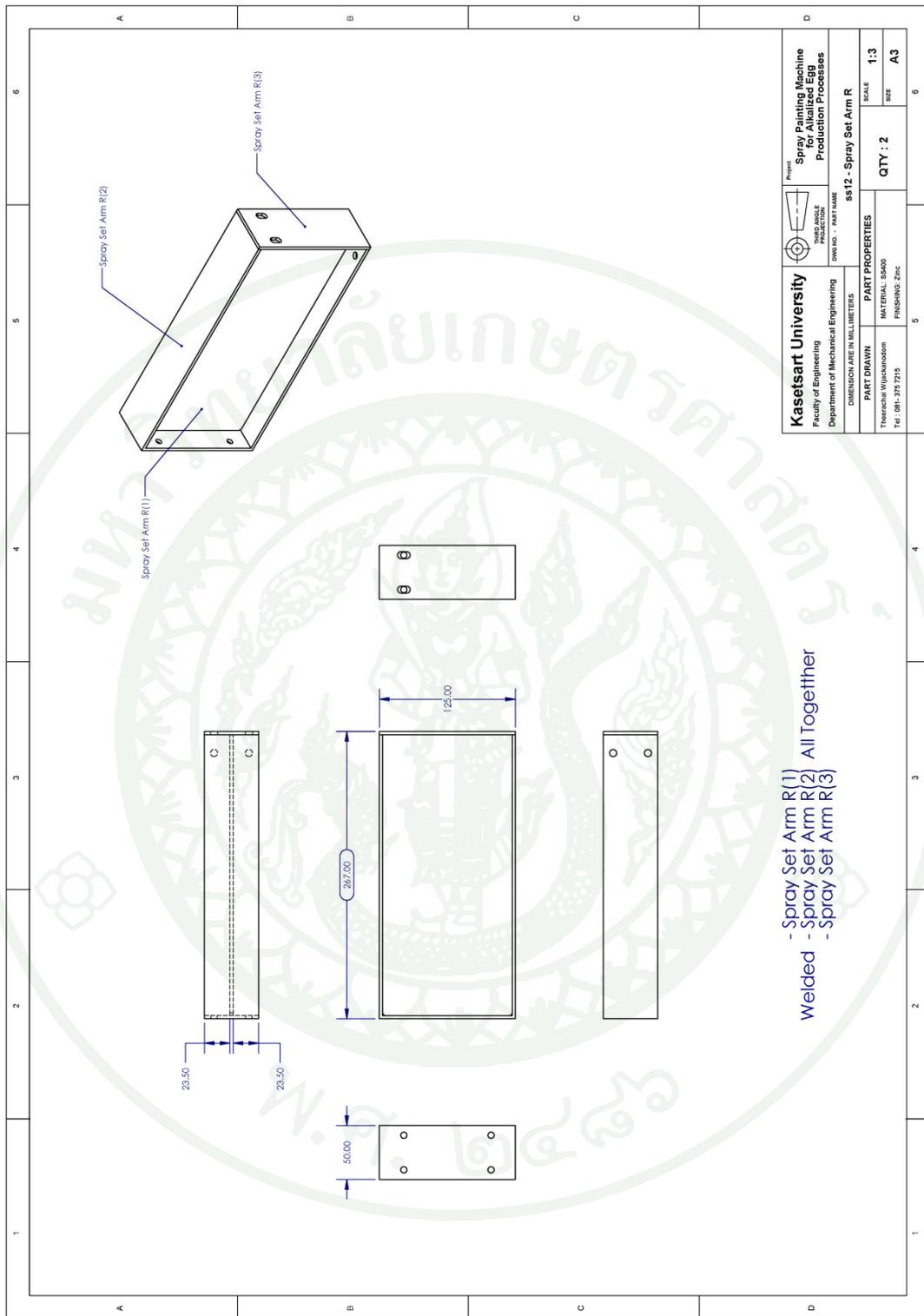


| | | | |
|--|-----------------------------------|--|-----------------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes PRODUCTION DWG. NO. - PART NAME ss11 - Spray Set Arm L | |
| PART DRAWN | PART PROPERTIES | SCALE | QTY. : 2 |
| Thirachai Wijitakarnsom TEL: 081-317210 | MATERIAL: S640 FINISHING: ZINC | 1:3 | SIZE: A3 |

Welded
 - Spray Set Arm L(1)
 - Spray Set Arm L(2)
 - Spray set Arm L(3)
 All Together

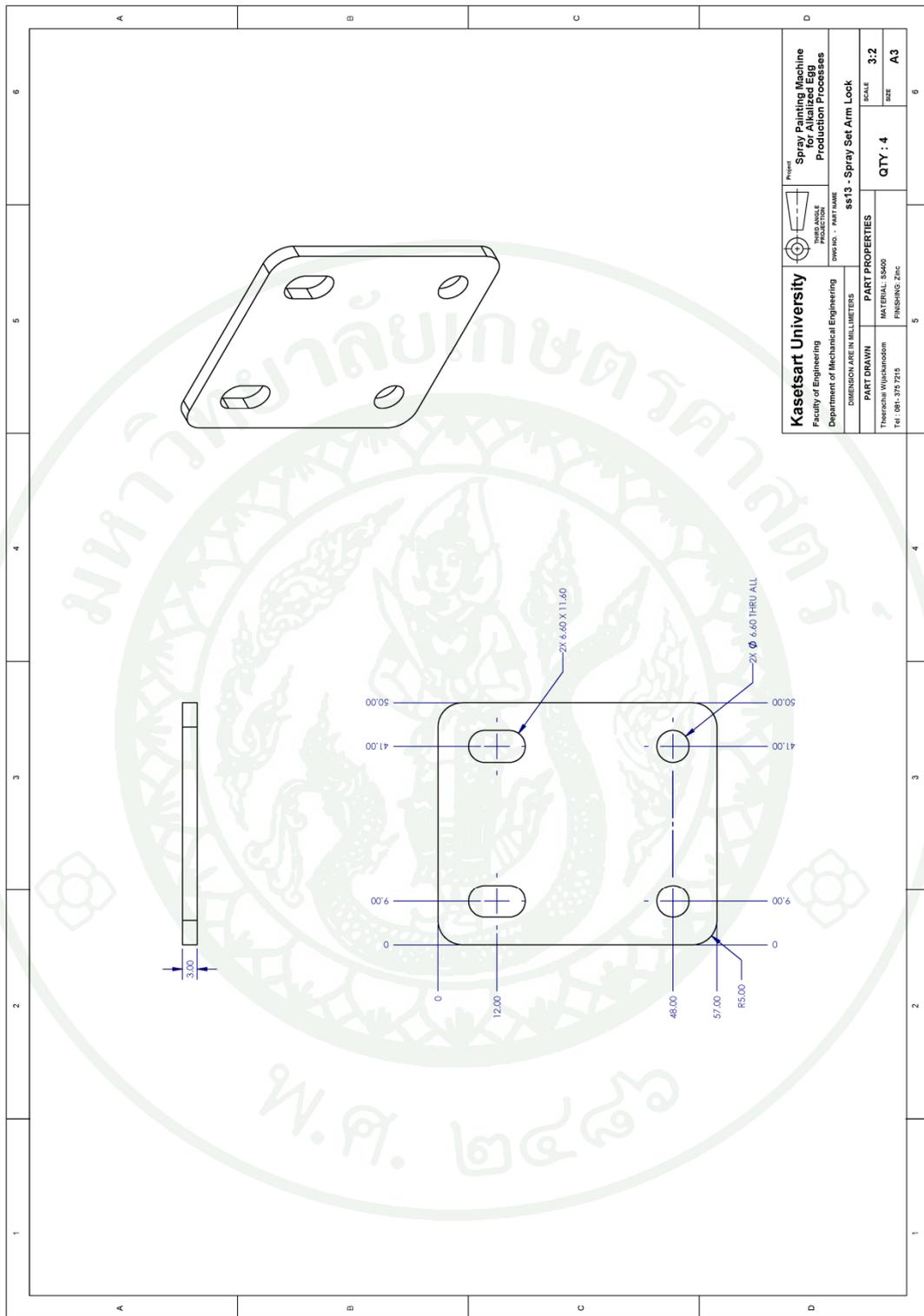


| | | | |
|---|--|--|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | DWS NO. - PART NAME 8512 - Spray Set Arm R(3) | Production Processes Spray Painting Machine for Alkalized Egg |
| | | | |
| PART DRAWN Theerachai Wijitkhamdom TEL: 081-317210 | PART PROPERTIES MATERIAL: S660 FINISHING: ZINC | SCALE 1:1 | SIZE A3 |

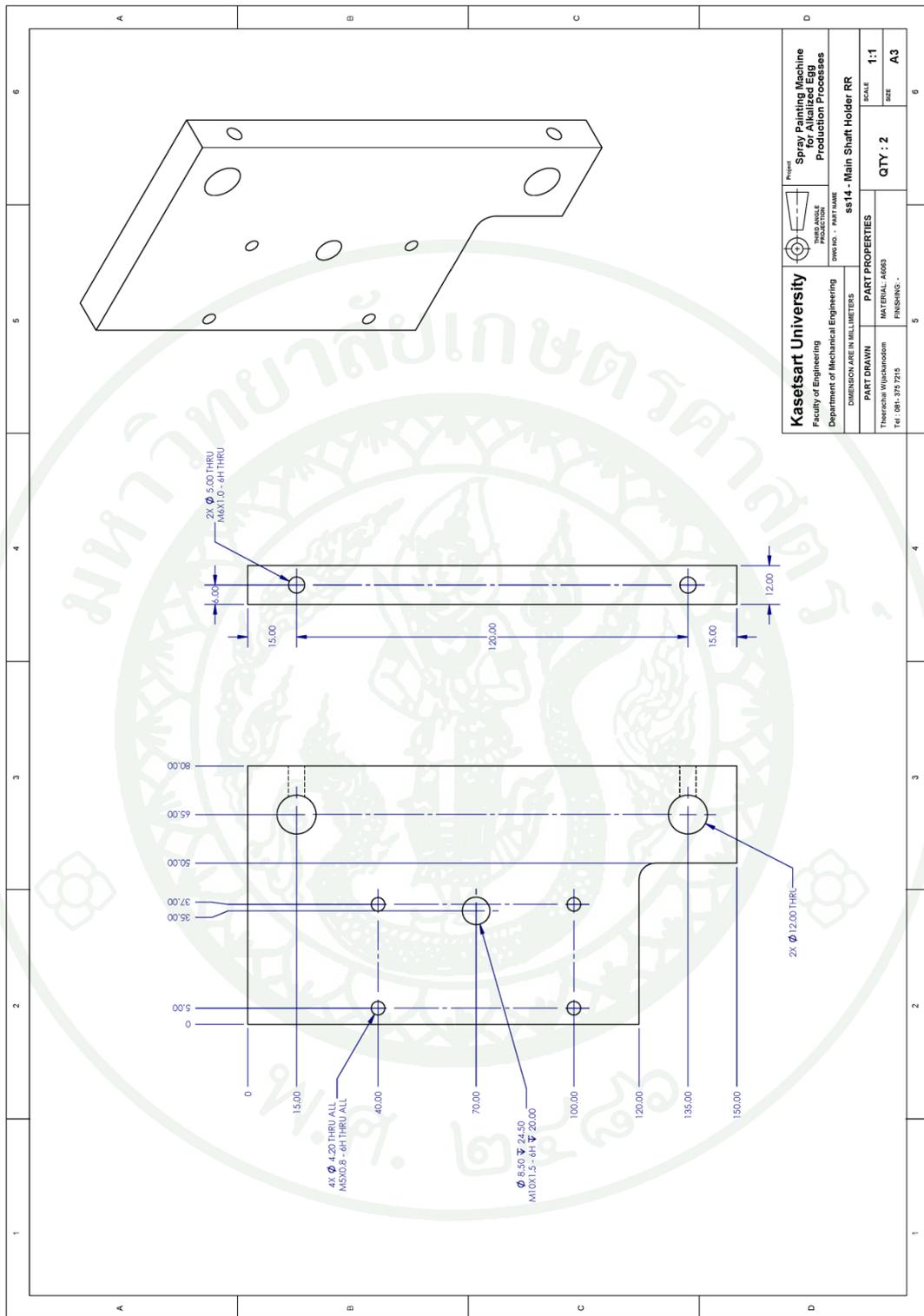


| | | | |
|---|--|--|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes DWG. NO. - PART NAME: ss12 - Spray Set Arm R | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES | |
| PART DRAWN: Thirachai Wijitkhamdom TEL: 091-3157210 | | SCALE: 1:3 QTY: 2 SIZE: A3 | |
| MATERIAL: S3040 FINISHING: ZINC | | | |

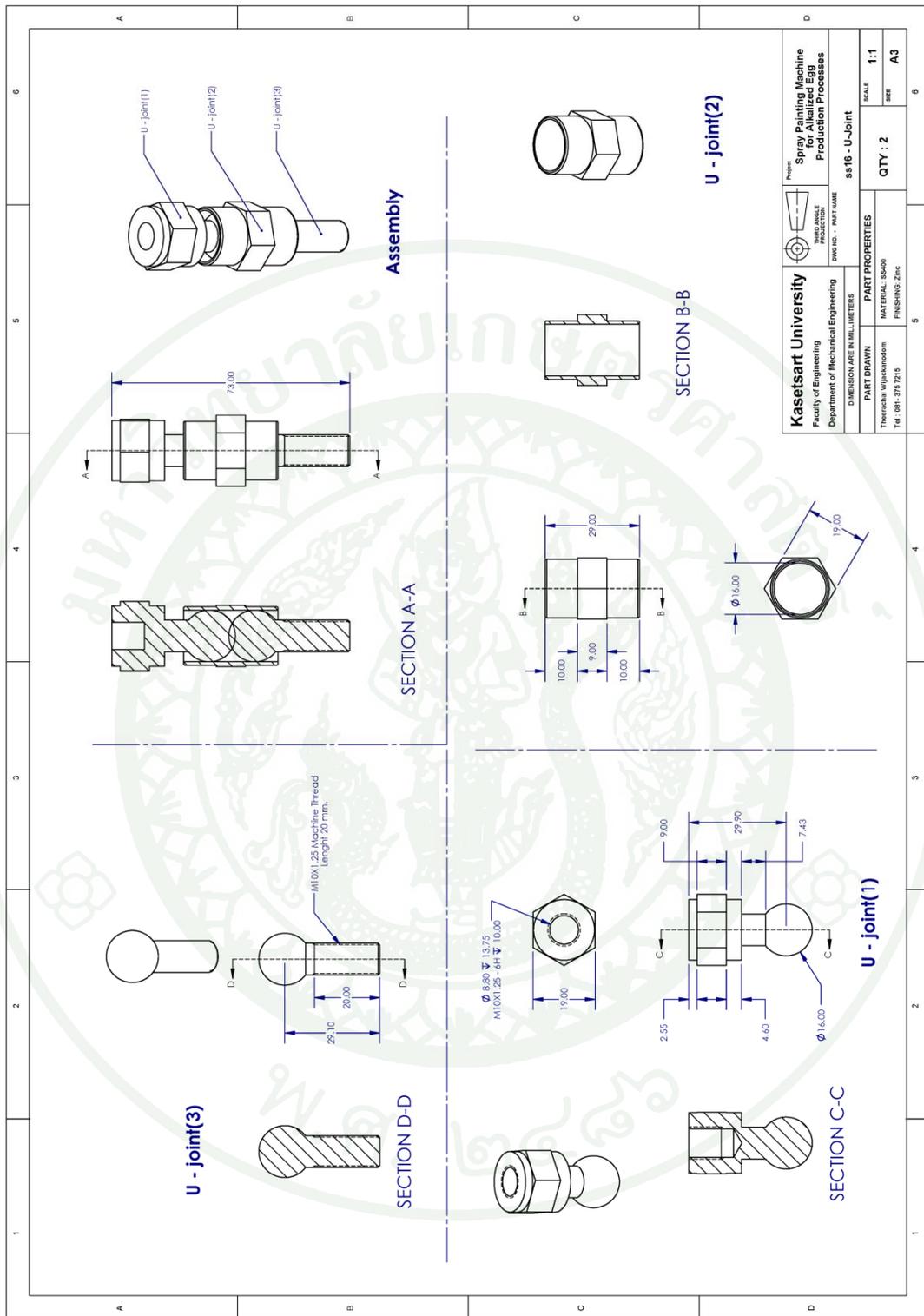
Welded - Spray Set Arm R(1) All Together
 - Spray Set Arm R(2)
 - Spray Set Arm R(3)



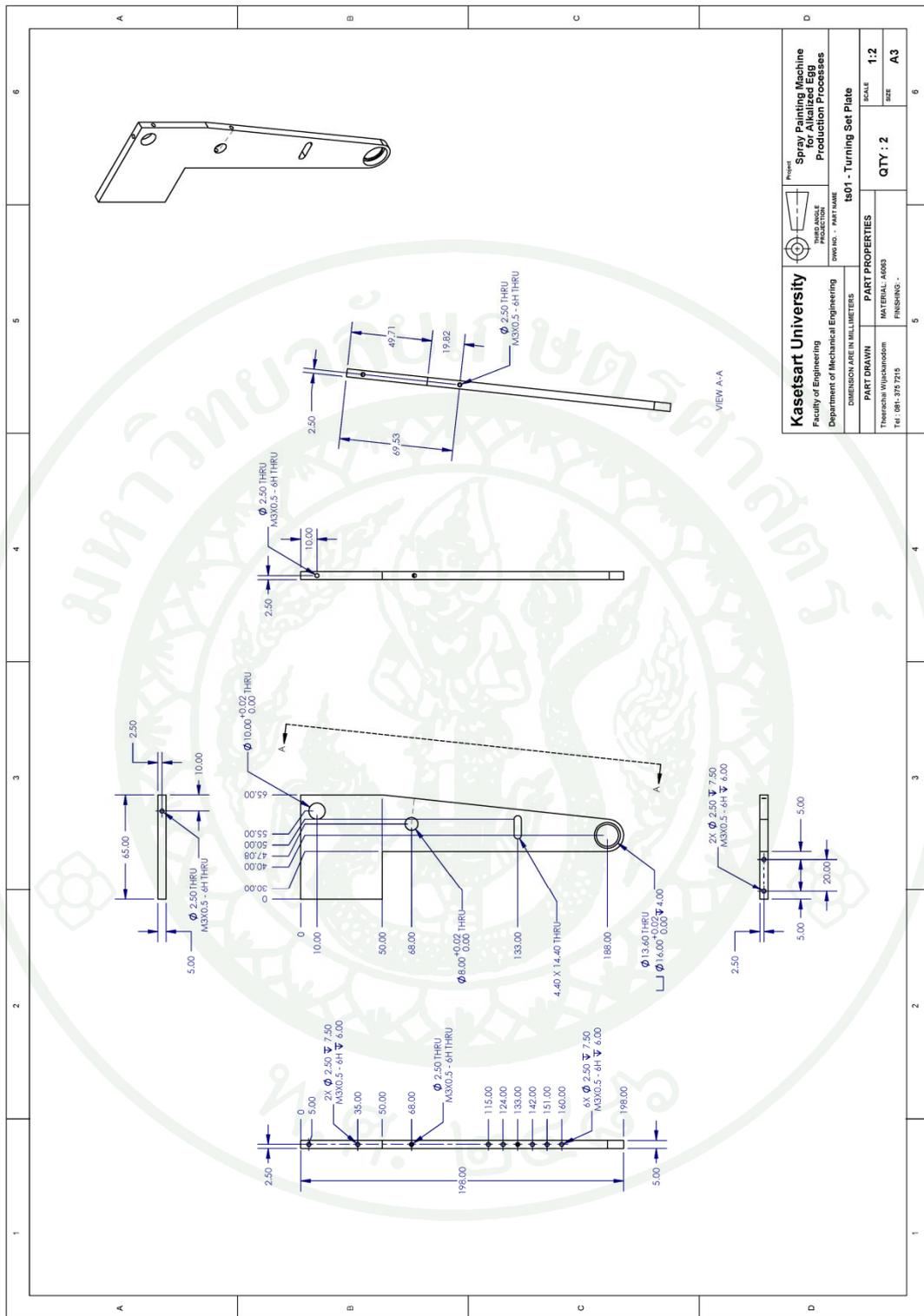
| | | |
|--|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes |
| | | DWG NO. - PART NAME: ss13 - Spray Set Aim Look |
| PART DRAWN Theerachai Wijitkhamdom TEL: 081-3151215 | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | SCALE 3:2 |
| QTY: 4 | | SIZE A3 |

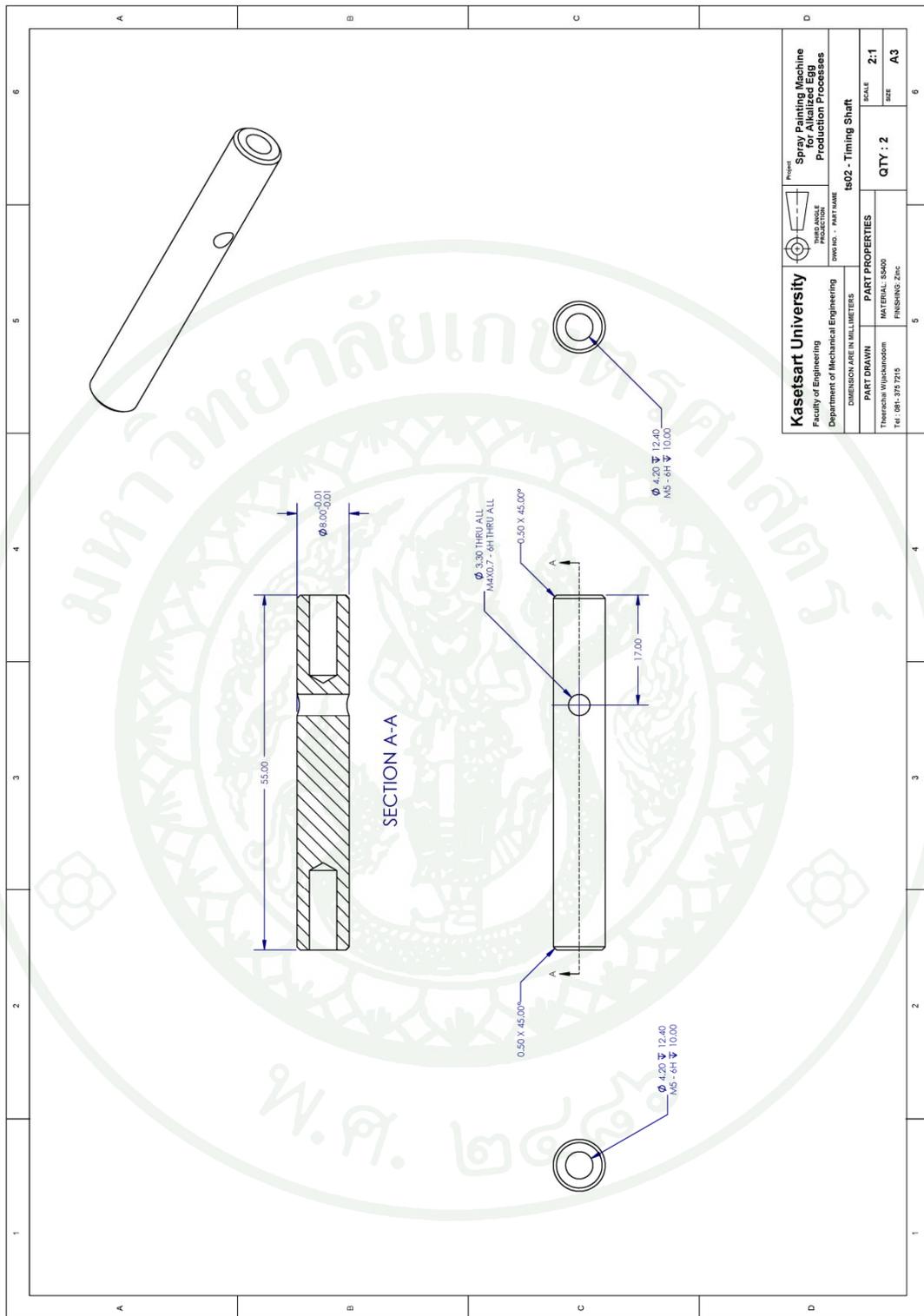


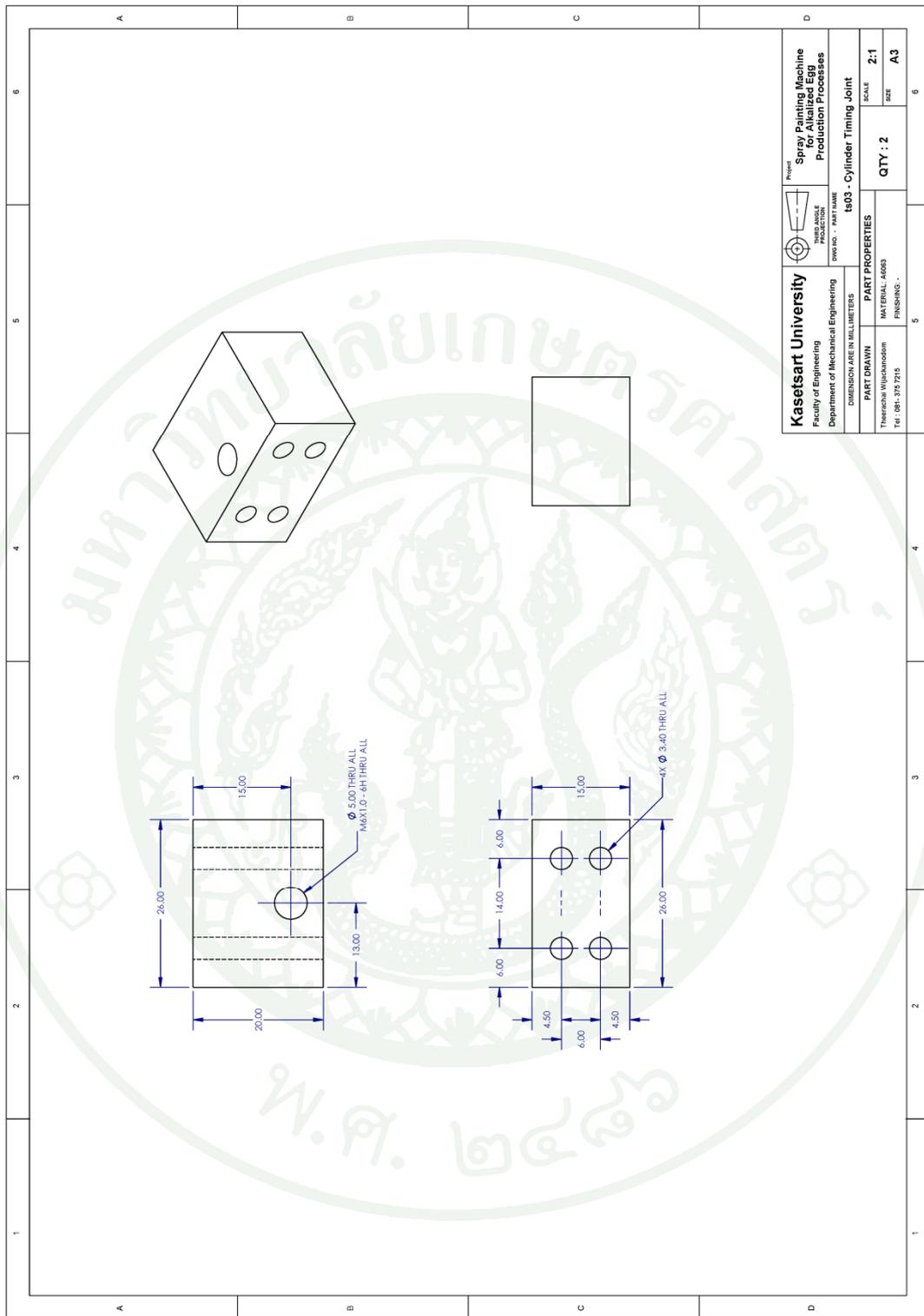
| | | | | |
|---|---------------------------------|--|---|--------|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | DWG NO. - PART NAME 8514 - Main Shaft Holder RR | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes | |
| | | | PART PROPERTIES | QTY: 2 |
| PART DRAWN Theerachai Wijitakarnadorn TEL: 081-3171210 | MATERIAL: A6063 FINISHING: - | SCALE 1:1 | SIZE A3 | 6 |

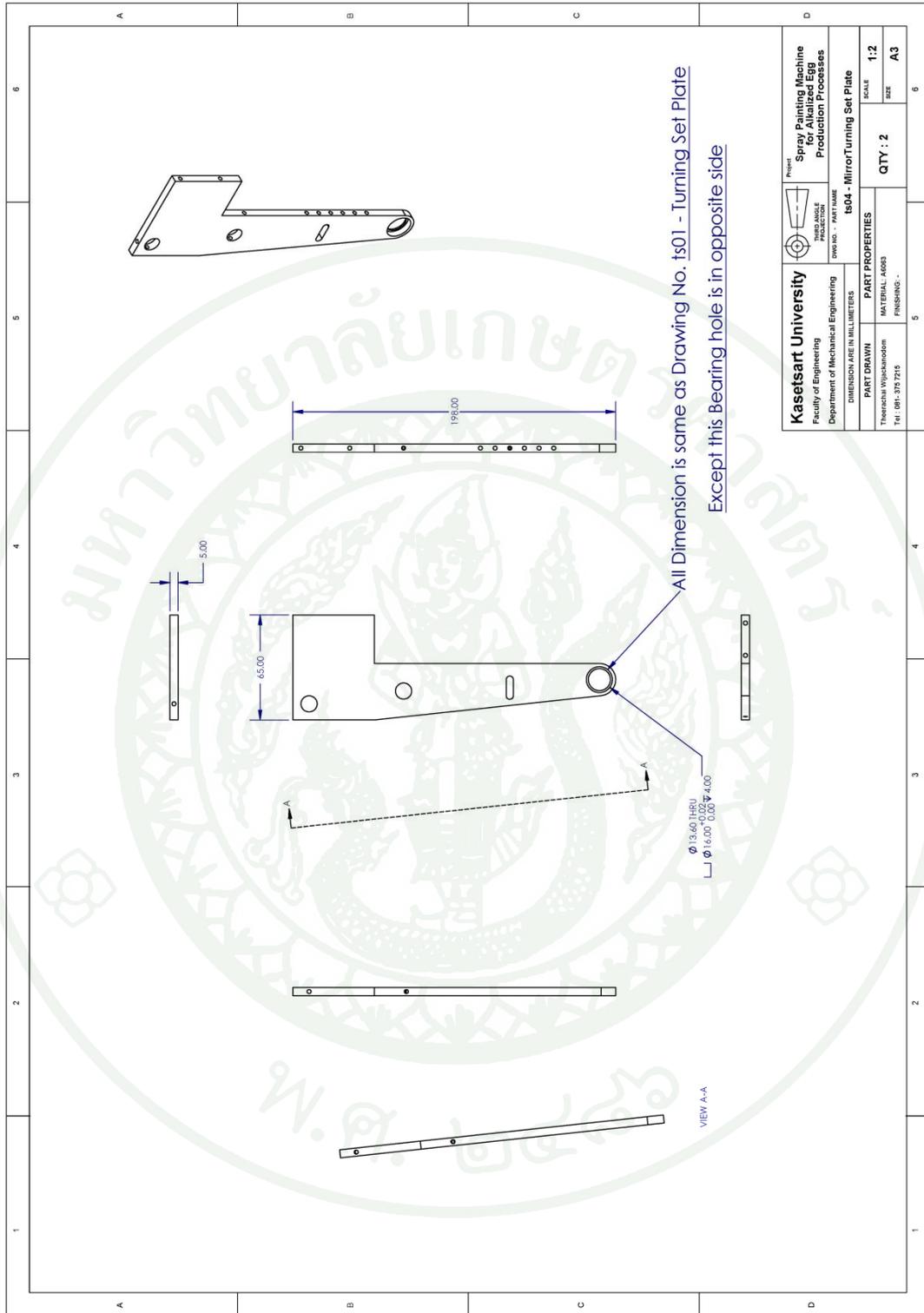


| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | DWS NO. - PART NAME ss16 - U-Joint | |
| PART DRAWN Thirachai Wijiamadorn TEL: 081-317210 | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC | |
| SCALE 1:1 | | QTY. : 2 | |
| SIZE A3 | | 6 | |

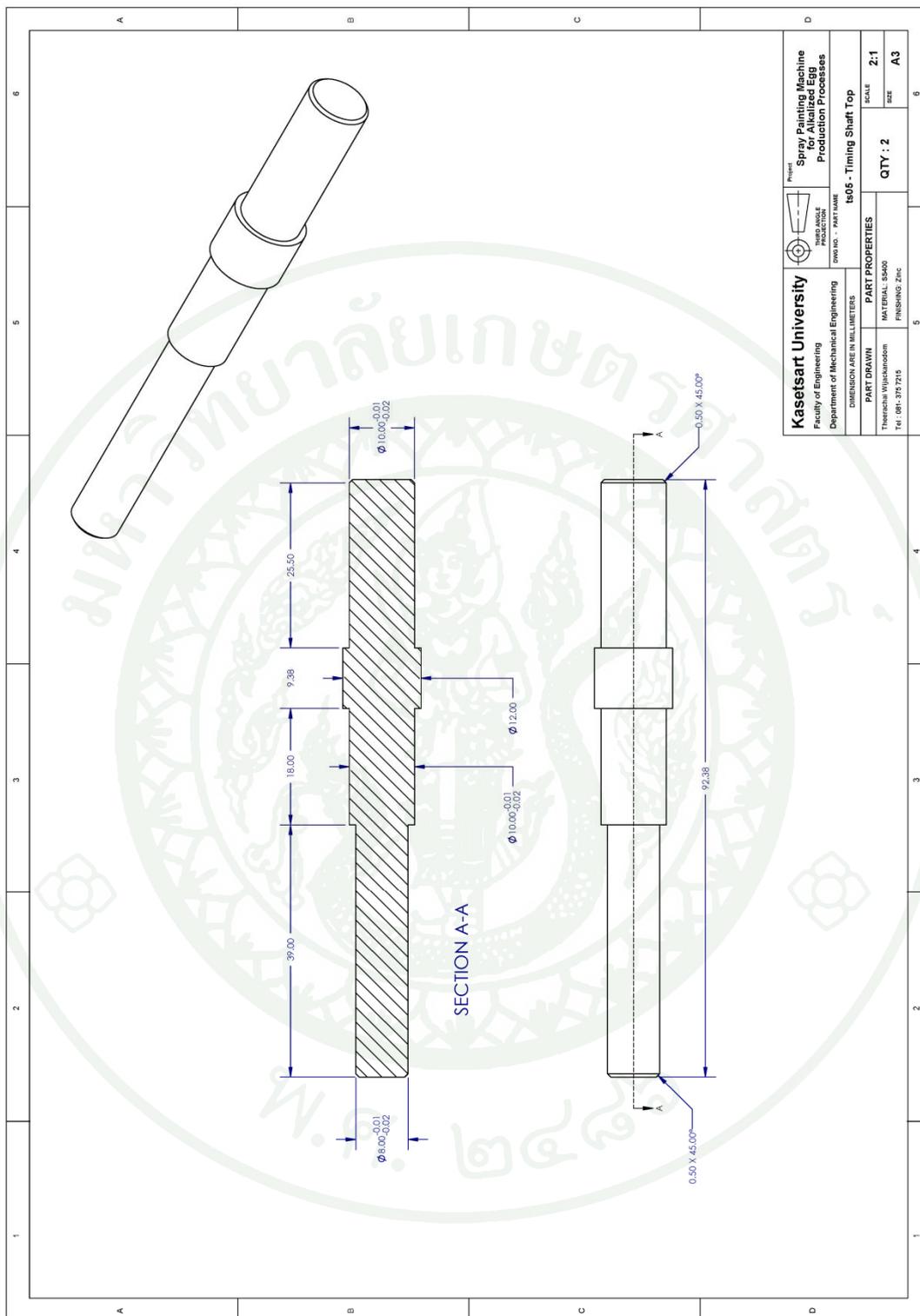


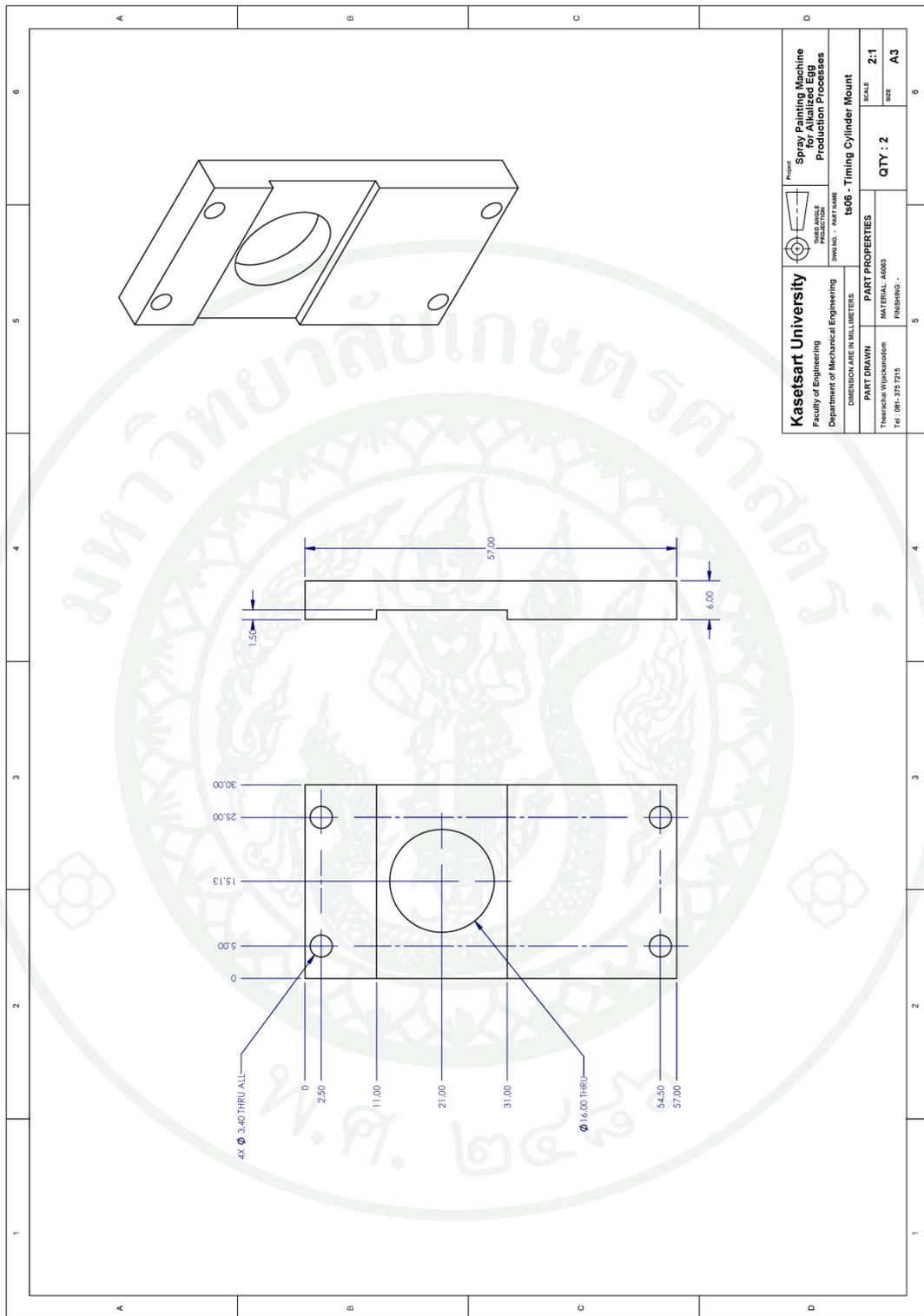




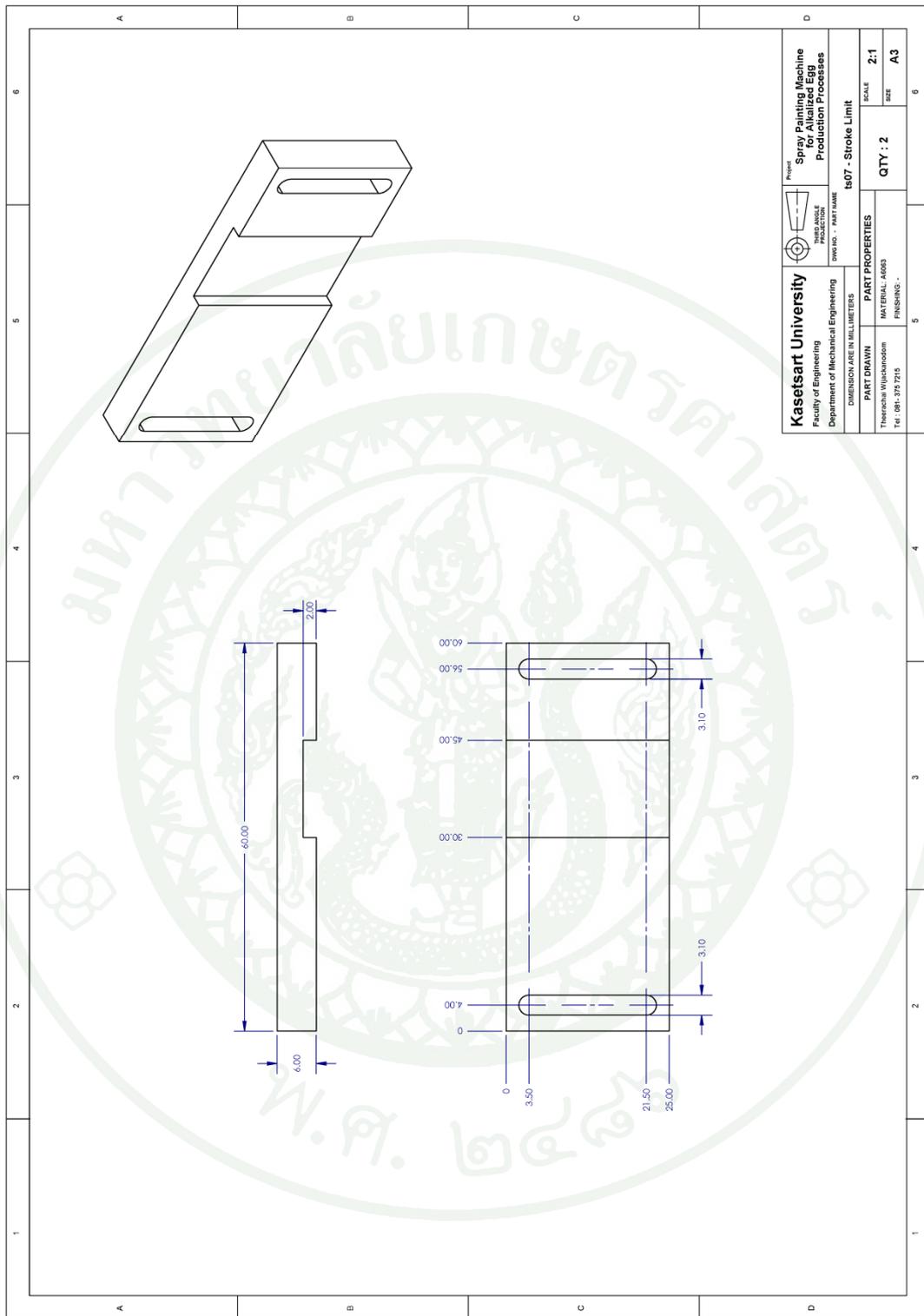


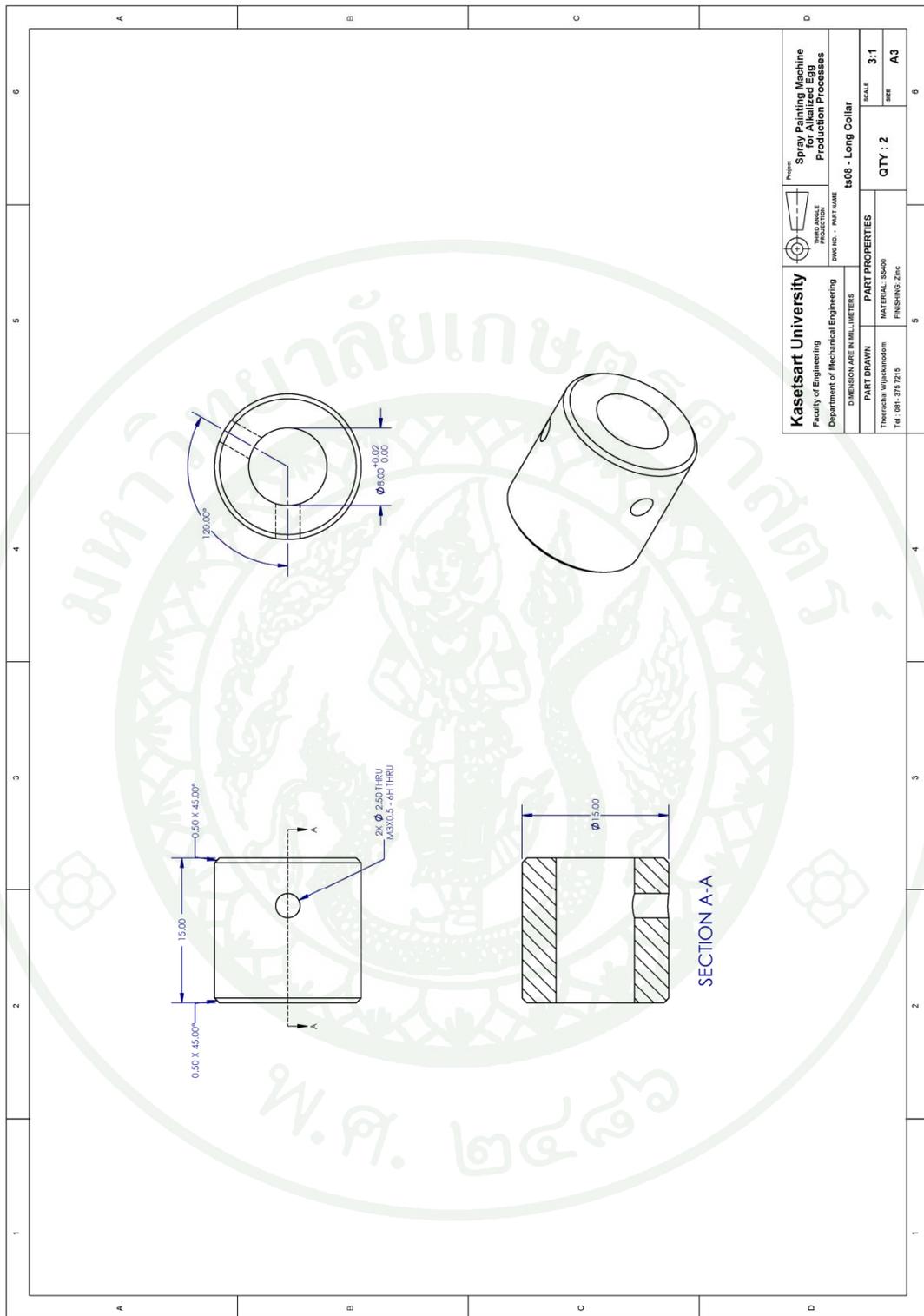
| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PROJECT Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes |
| | DWS NO. - PART NAME ts04 - MirrorTurning Set Plate |
| PART DRAWN Thirachai Wijitakuladorn TEL: 081-3171210 | PART PROPERTIES MATERIAL: A6063 FINISHING: - |
| SCALE 1:2 | QTY: 2 |
| SIZE A3 | |



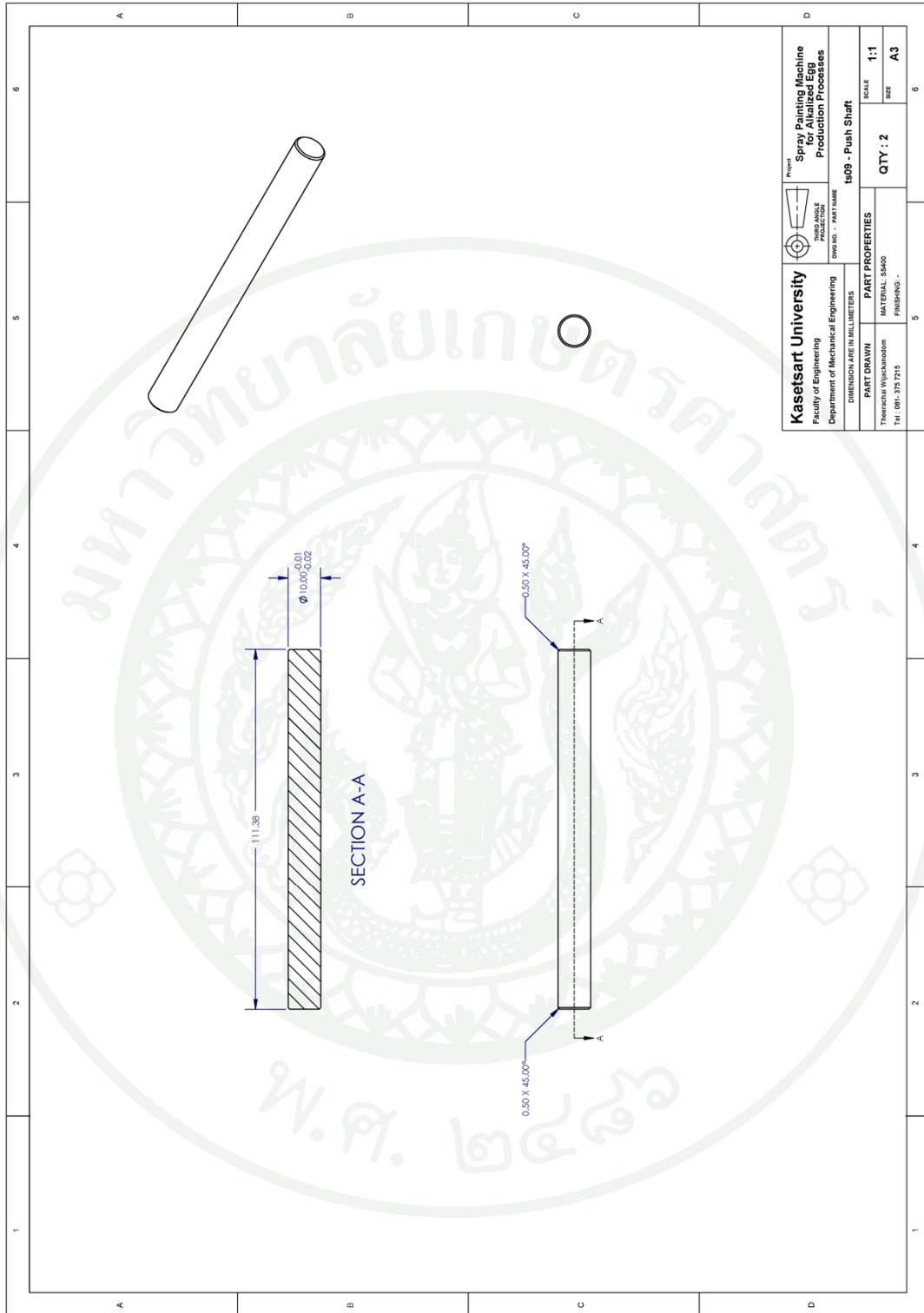


| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |
| | DWG NO. - PART NAME Is06 - Timing Cylinder Mount |
| PART DRAWN Theerachai Rajakarnsorn TEL: 081-3157210 | PART PROPERTIES MATERIAL: A6063 FINISHING: - |
| QTY: 2 | SCALE 2:1 |
| SIZE A3 | 6 |

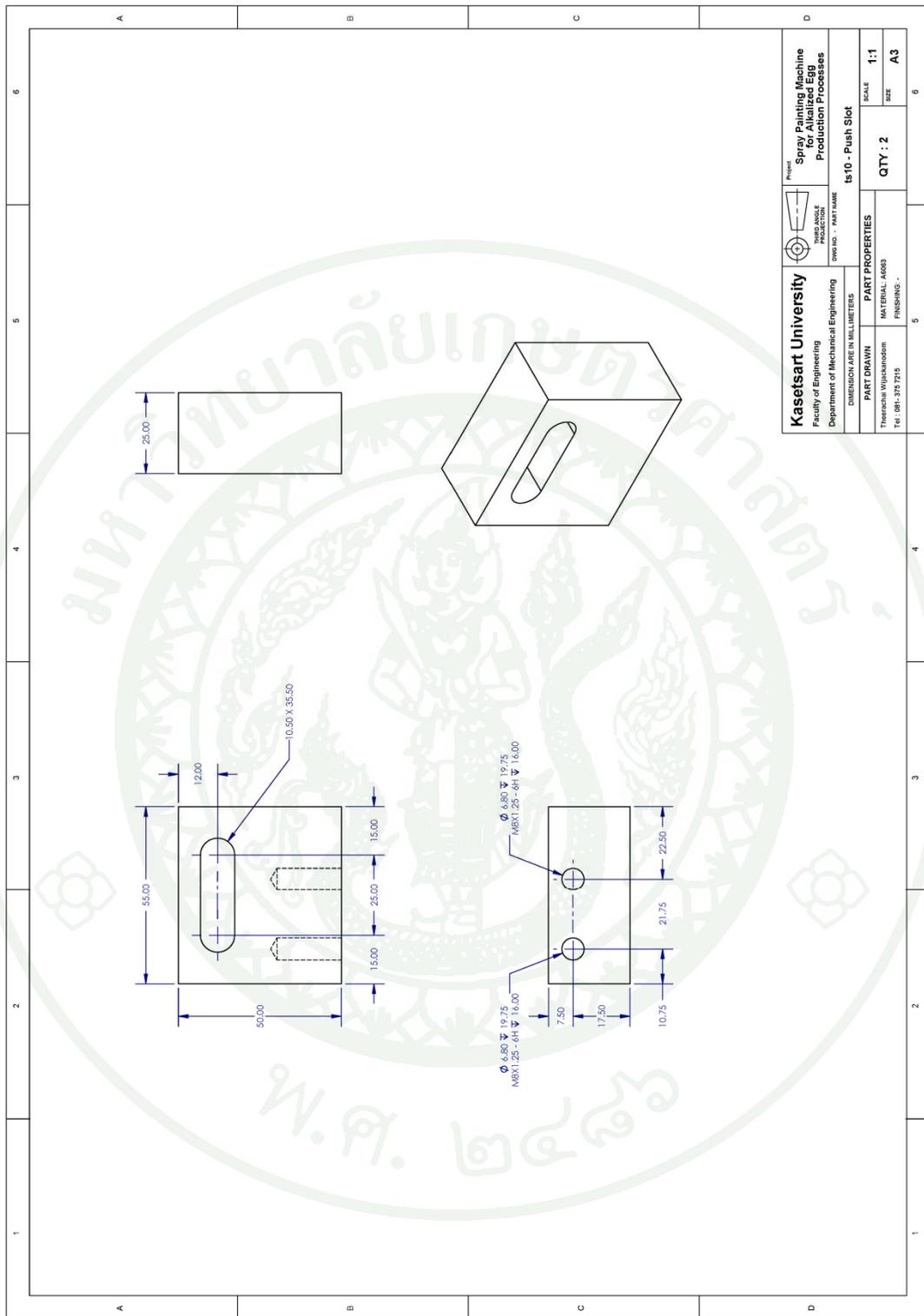


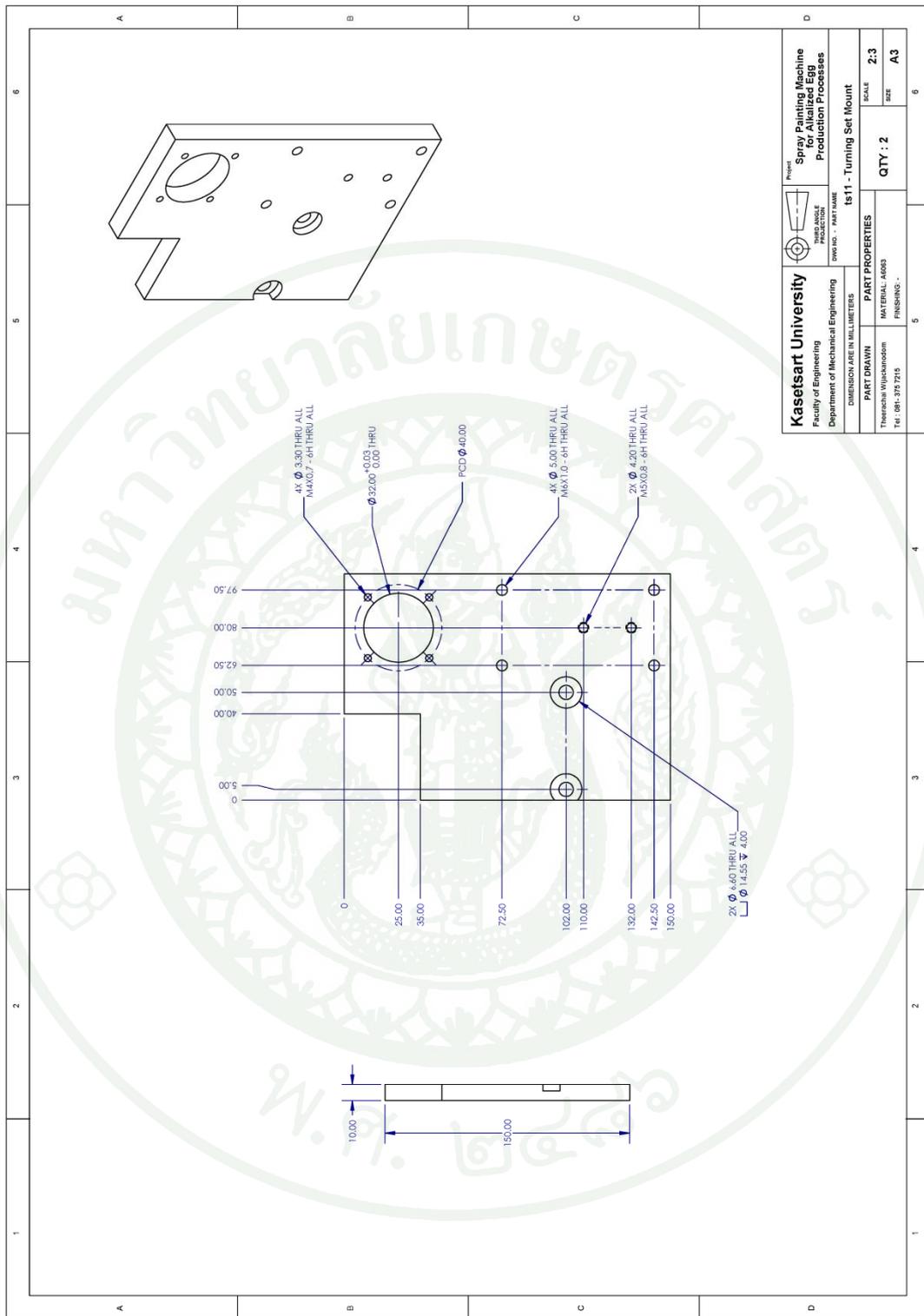


| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PRODUCTION PROCESS IS08 - Long Collar | Project: Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes | |
| | | PART DRAWN Thirachai Wijiamadorn TEL: 081-3157210 | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |
| QTY: 2 | | SCALE: 3:1 | SIZE: A3 |

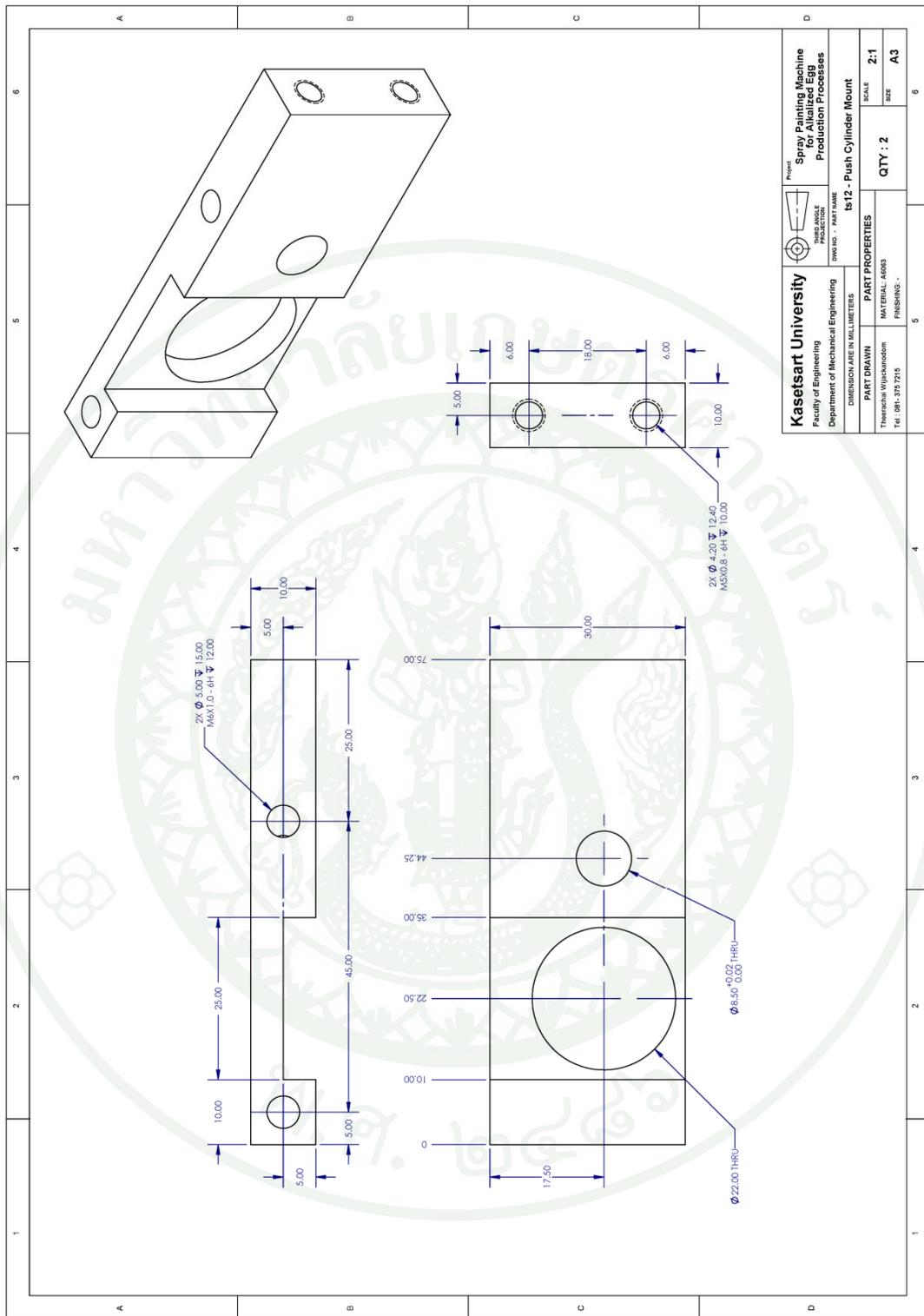


| | | |
|---|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Production Process ts09 - Push Shaft | Project Spray Painting Machine for Alkalized Egg Production Processes |
| | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS DWS NO. - PART NAME | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: - |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: - | QTY: 2 SIZE A3 |

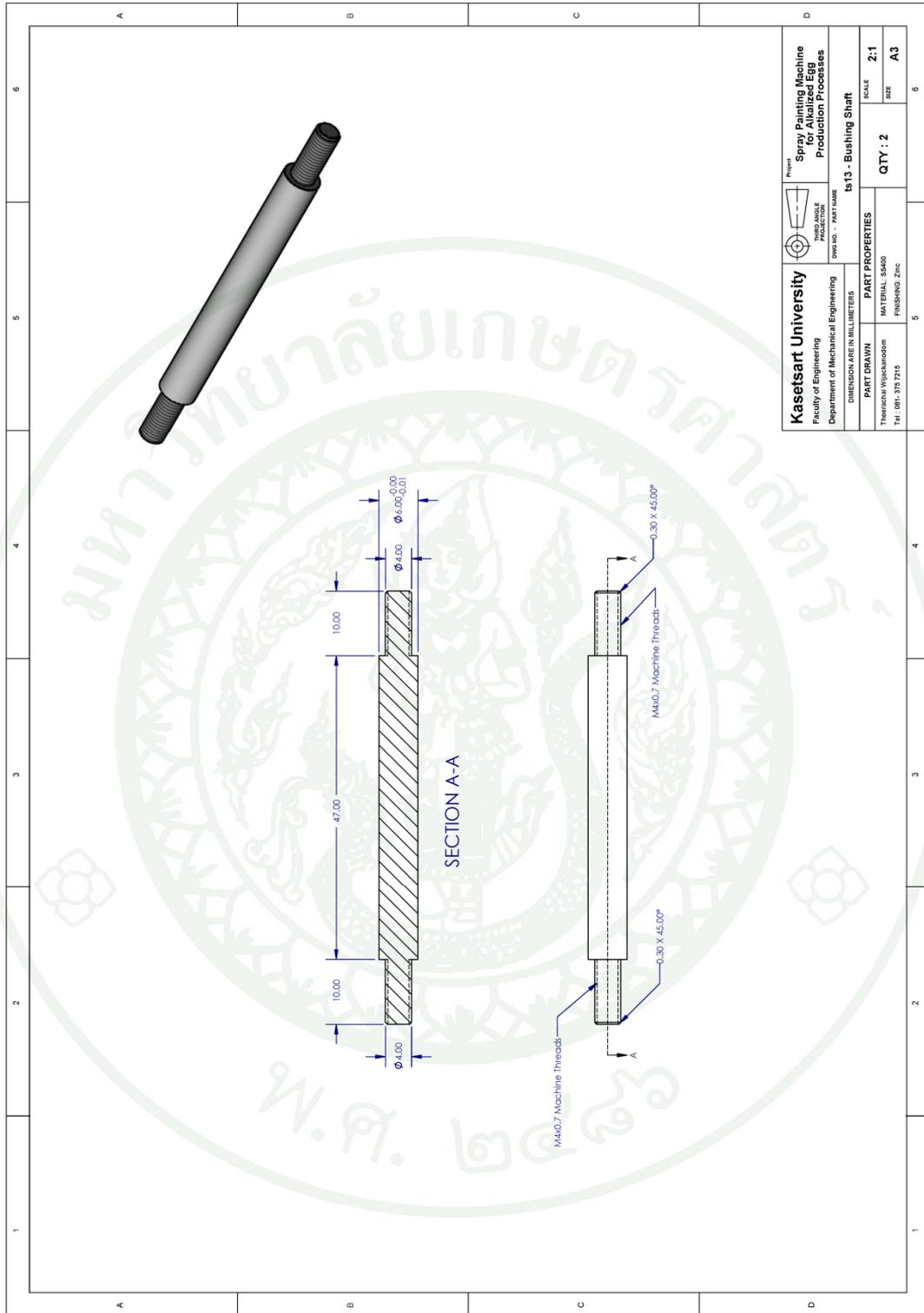




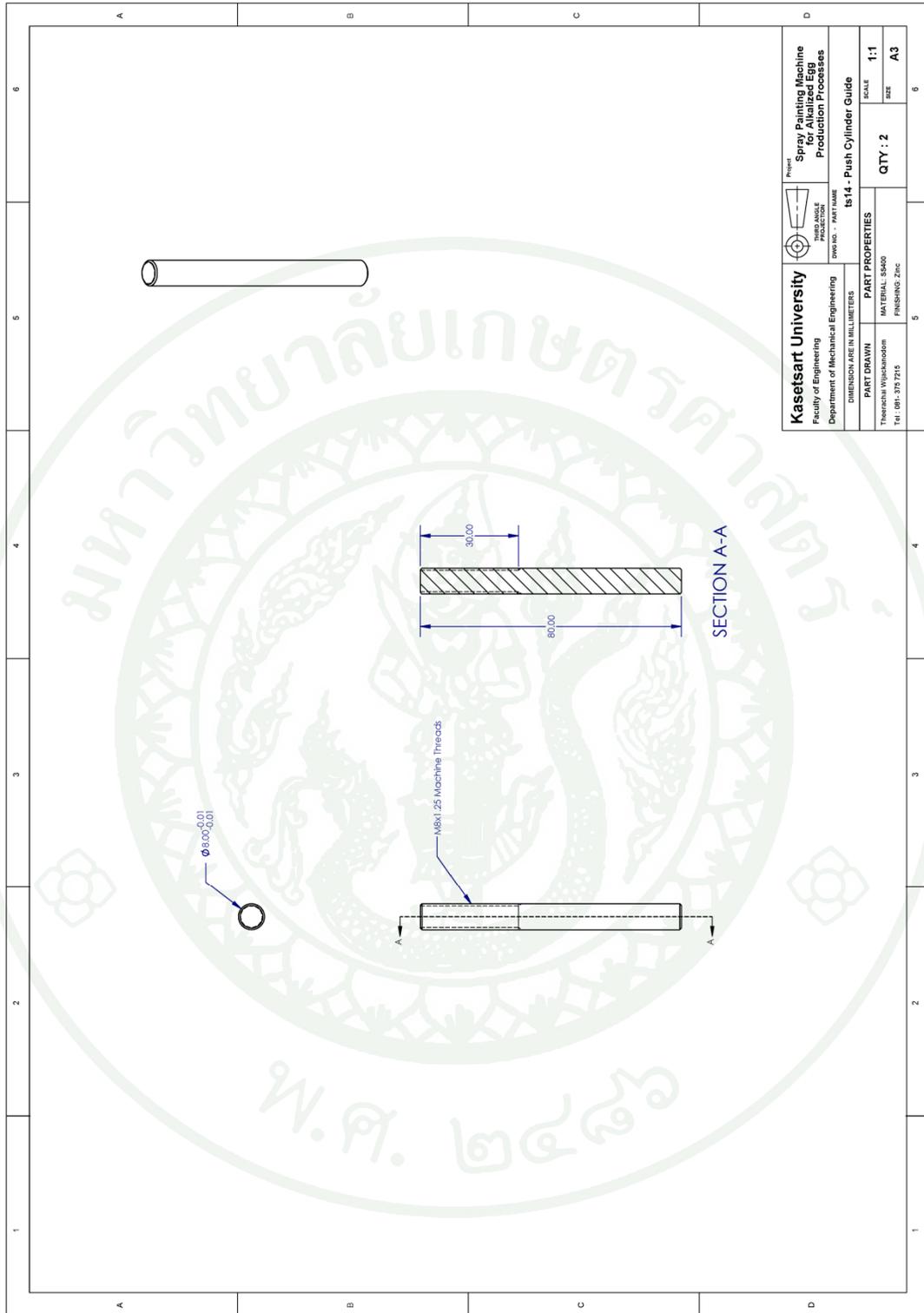
| | | | |
|--|--|--|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes DWG. NO. - PART NAME: ts11 - Turning Set Mount | |
| PART DRAWN: Thirachai Wijakarnadorn TEL: 081-3171216 | | PART PROPERTIES: SCALE: 2:3 MATERIAL: Al6063 FINISHING: - | |
| | | QTY: 2 SIZE: A3 | |



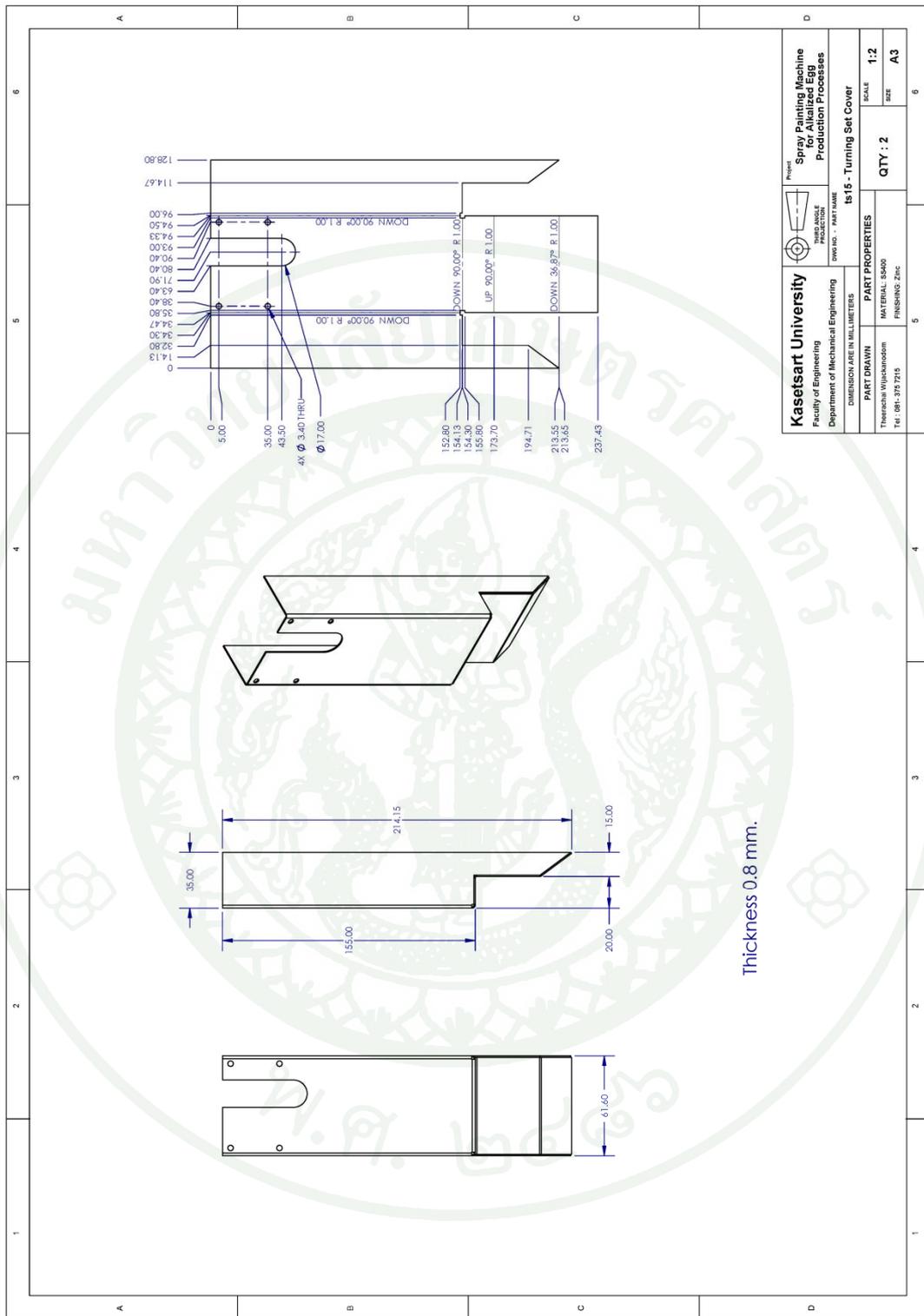
| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes |
| | Dwg. No. - PART NAME: ts12 - Push Cylinder Mount |
| DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | PART PROPERTIES MATERIAL: Al6063 FINISHING: - |
| PART DRAWN: Thirachai Wijitakomdom TEL: 081-3151215 | SCALE: 2:1 QTY: 2 SIZE: A3 |



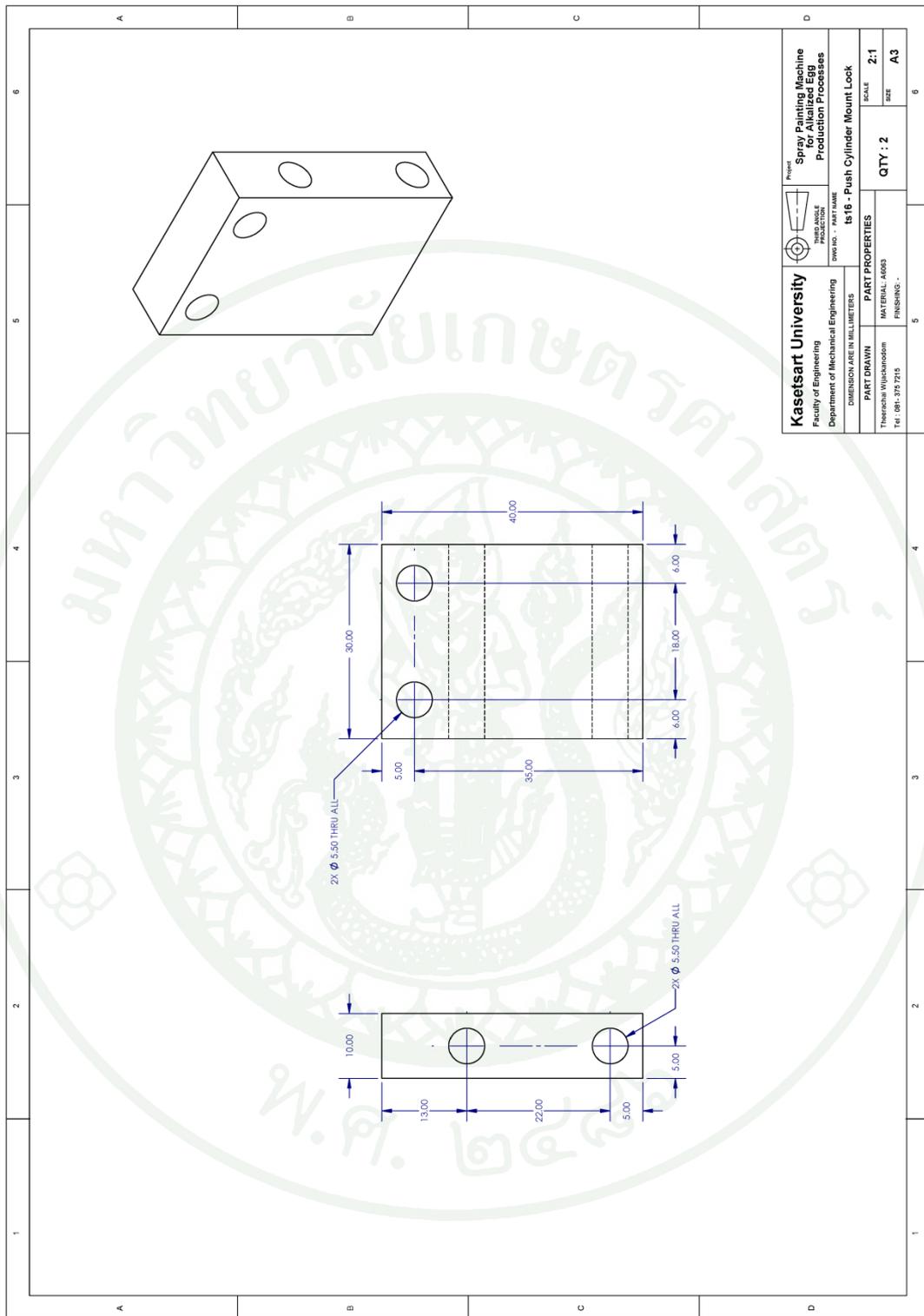
| | |
|--|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | Project Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes |
| | Dwg. No. - PART NAME ts13 - Bushing Shaft |
| PART DRAWN Theerachai Wijakhamolam TEL: 081-3157215 | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |
| QTY: 2 | SCALE: 2:1 SIZE: A3 |



| | | | |
|---|--|---|--|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | | Project: Spray Painting Machine for Allized Egg Production Processes PRODUCTION DWS No. - PART NAME: ts14 - Push Cylinder Guide | |
| DIMENSION ARE IN MILLIMETERS | | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISH: ZINC | |
| PART DRAWN: Thirachai Wijiamadorn TEL: 081-3151210 | | SCALE: 1:1 QTY: 2 SIZE: A3 | |



| | |
|---|---|
| Kasetsart University Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering | Project: Spray Painting Machine for Allalized Egg Production Processes |
| | DIMENSION ARE IN MILLIMETERS |
| DWS NO. : PART NAME Is15 - Turning Set Cover | SCALE 1:2 |
| PART DRAWN Thirachai Wijitmanodom TEL: 081-3171215 | PART PROPERTIES MATERIAL: S45C FINISHING: ZINC |
| QTY: 2 | |
| SIZE A3 | |



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|--------------------------------|--|
| ชื่อ | นายธีรชัย วิจักข์ โณดม |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | 24 ตุลาคม พ.ศ. 2530 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| ประวัติการศึกษา | ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | - |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | - |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | - |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุนวิจัยระดับมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (MAG) จาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) |