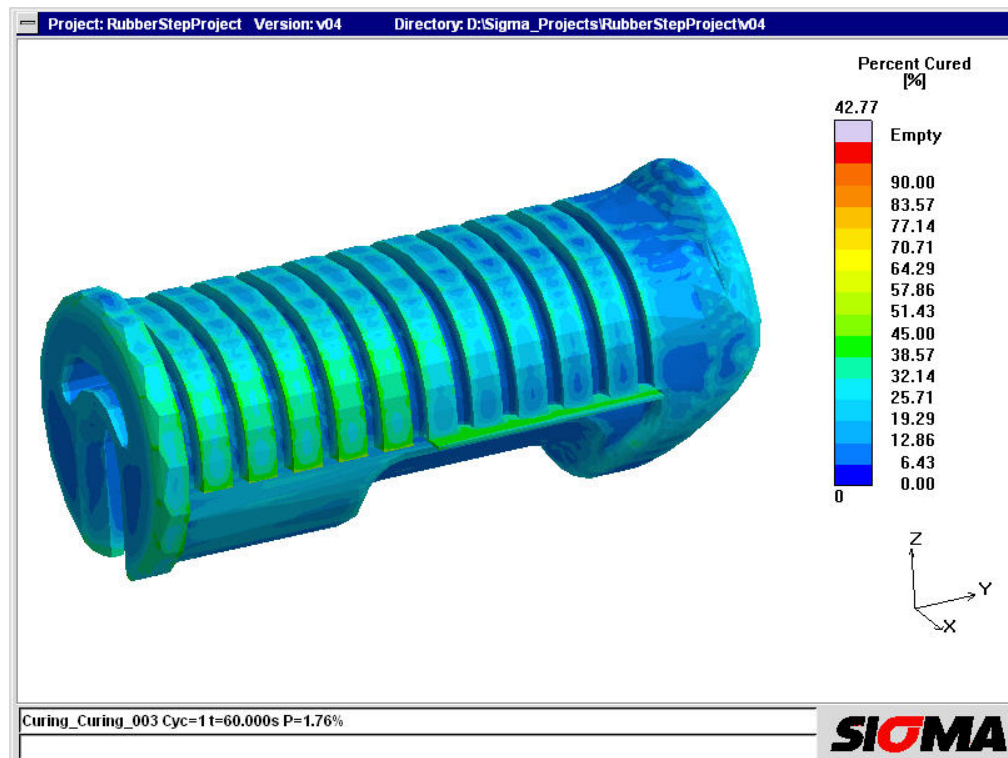
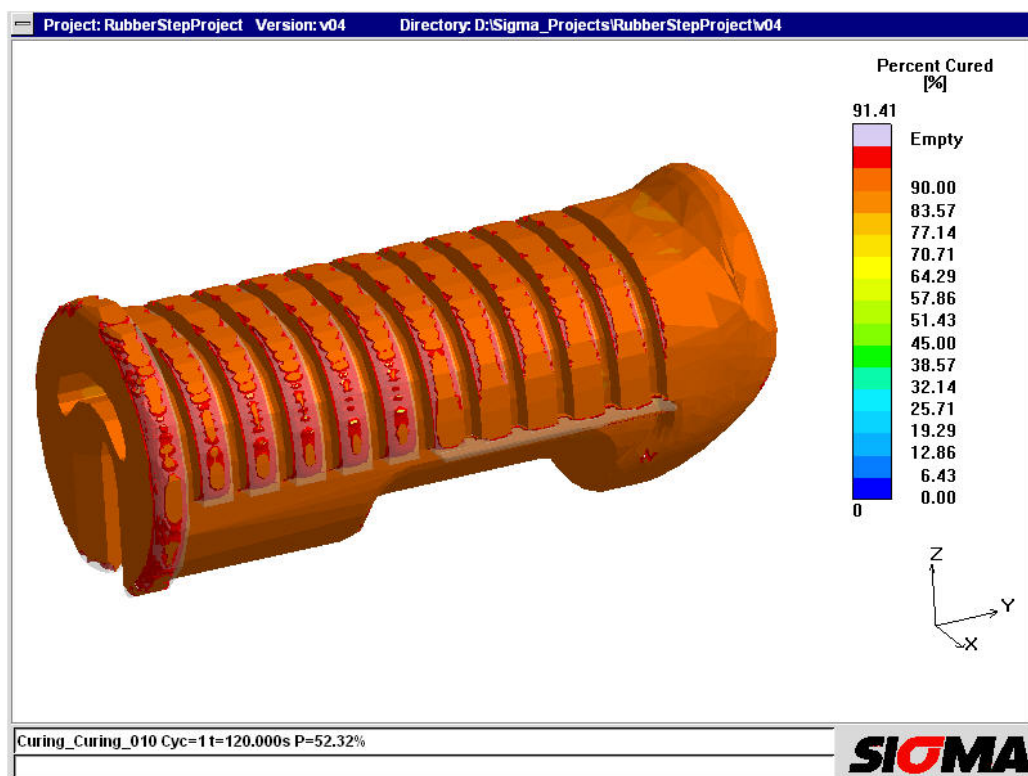
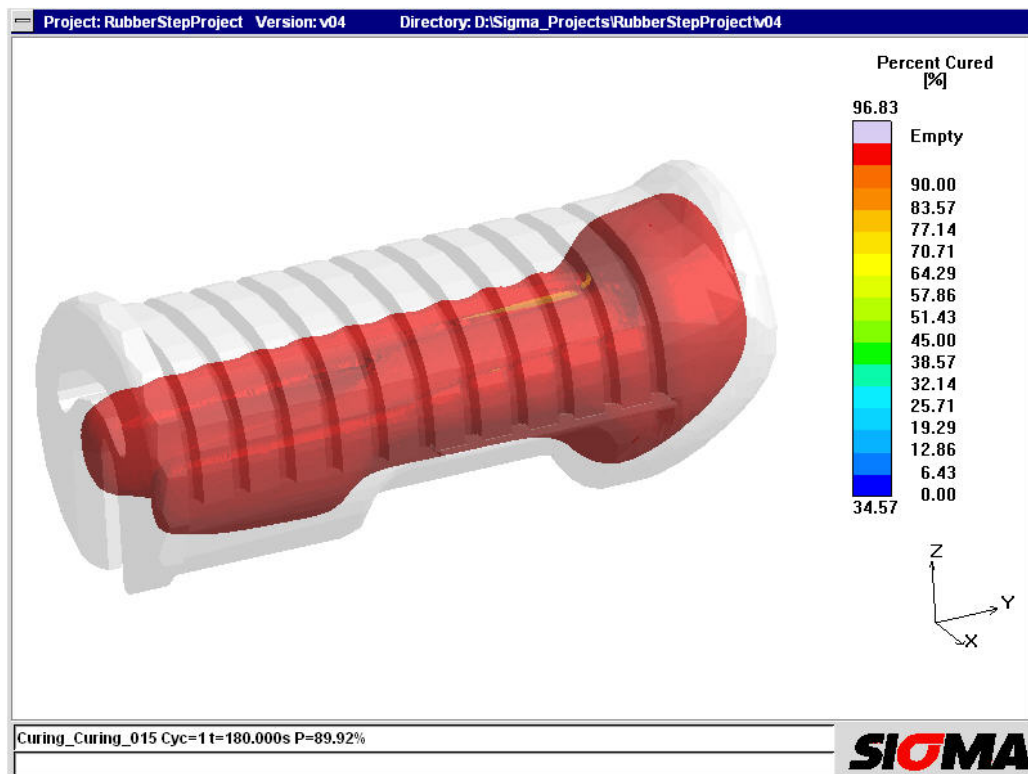




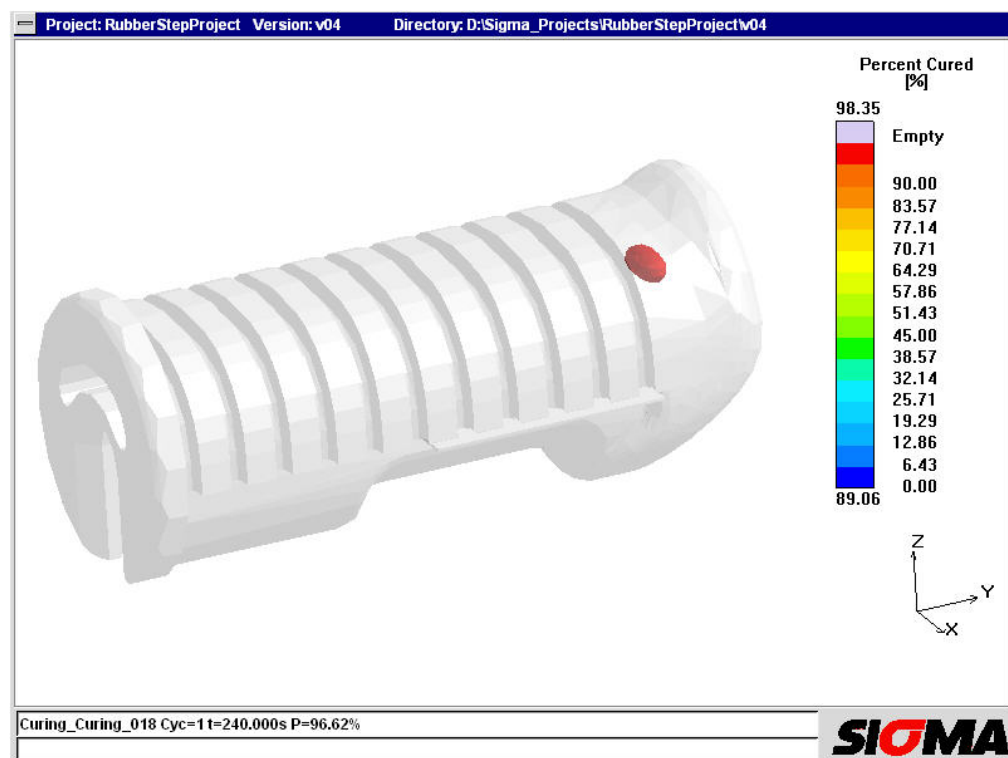
รูปที่ 147 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 วินาที



รูปที่ 148 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 120 วินาที



รูปที่ 149 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 180 วินาที



รูปที่ 150 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 วินาที

6. สรุปผลการวิจัย

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยางของผลิตภัณฑ์ยางรองเท้าจักรยานยนต์ (Rubber Step) โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA ช่วยในการวิเคราะห์ ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจะใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAE) ในการออกแบบแม่พิมพ์ซึ่งจะมีจำนวนชิ้นงาน 4 เบ้าโดยวางแผนเป็นด้านหน้า 2 ชิ้นและด้านหลังอีก 2 ชิ้น โดยจะมีลักษณะของรูเข้าเบ้าพิมพ์ที่เป็นแบบเข้าทางด้านข้างของชิ้นงาน โดยความยาวของรูเข้ามาถึงที่ระยะกึ่งกลางของชิ้นงานเท่านั้น เนื่องจากผลของการวิเคราะห์โดยโปรแกรมนั้น ระยะเวลาของการไหลเข้าของเนื้อยางที่ลักษณะของรูไหลเข้าแบบยาวตลอดทั้งชิ้นงาน กับยาวเพียงครึ่งของชิ้นงานมีระยะเวลาไม่ต่างกันมากนัก และ ใช้ชุดสไลด์ 4 ตัว โดยการบังคับการเคลื่อนที่เปิดและปิดโดยใช้กลไกการขึ้นลงของแม่พิมพ์ และได้สร้างรูเพื่อที่จะเป็นตัวในชุดให้ความร้อนในแม่พิมพ์ตัวบน และตัวล่างอย่างละ 2 รู เมื่อออกแบบแม่พิมพ์แล้วนำมาวิเคราะห์โดยการจำลองการไหล โดยใช้ยาง NR40 ผลของการเปรียบเทียบลักษณะของการไหลของยางเข้าภายในแม่พิมพ์จากการจำลองด้วยโปรแกรมและการทดลองฉีดจริง โดยเปลี่ยนแปลงค่าระยะถอยของสกรูจากทุกๆ ระยะของสกรูแสดงให้เห็นว่าการไหลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมและการทดลองฉีดจริงมีลักษณะการไหลที่ใกล้เคียงกัน และผลของแรงดันฉีดของการทดลองฉีดจริงนั้นจะมีค่าที่น้อยกว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม สาเหตุเนื่องมาจากผลของปรับแต่งรูเข้าเพื่อให้ความสมดุลของชิ้นงาน ทำให้ขนาดความหนาของรูเข้ามีขนาดที่มากกว่าของแบบจำลองจึงทำให้ปริมาณของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์มีปริมาณที่มากกว่า ซึ่งดูได้จากการไหลเข้าที่ระยะสกรูที่ 50 และ 100 มิลลิเมตร และแรงดันฉีดภายในรูจ่ายเนื้อยางที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าความดันนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นจนความดันไปถึงประมาณ 1,300 บาร์ และความดันจะคงที่จนยางไหลเข้าไปเต็มแม่พิมพ์ส่วนของการทดลองฉีดนั้นก็จะได้ความดันที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นเช่นกันและไปคงที่ที่ความดันสูงสุดที่ประมาณ 900 บาร์ และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีดความดันก็จะลดลง ระยะเวลาของการสัมผัสของยางกับอากาศนั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสัมผัสอากาศของยางนั้นจุดที่มีค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงานซึ่งจะมีโอกาสที่จะทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดโพรงของอากาศที่บริเวณผิวได้ ระยะเวลาที่ยางถูกฉีดเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ระยะเวลาของเนื้อยางในแต่ละส่วนจะไม่เท่ากัน ซึ่งจุดที่ยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์ที่มีเวลานานที่สุดซึ่งจะอยู่ที่บริเวณด้านปลายในสุดของชิ้นงาน ระยะของยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ซึ่งระยะทางที่ยางเข้าไปในนั้นจะมีระยะทางยาวที่สุดซึ่งจะอยู่ที่บริเวณด้านปลายในสุดของชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดที่บริเวณเดียวกันเหมือนกับระยะเวลาที่เนื้อยางไหลเข้าไป ระยะเวลาของยางในแต่ละส่วนของชิ้นงานซึ่งยางที่ไหลเข้ามาก่อนจะไปอยู่ที่ส่วนด้านปลายของชิ้นงาน ซึ่งเนื้อยางที่มีระยะเวลาน้อยจะไหลเข้ามาที่หลังจะทำให้เนื้อยางเต็มแม่พิมพ์ในส่วนนั้นก่อนแต่ในส่วนที่เนื้อยางที่ไหลเข้ามาก่อนหน้านี้จะมีระยะเวลามากจะไหลไปเติมส่วนที่ยังไม่เต็ม เวลาที่ยางสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ ซึ่งระยะเวลาในการสัมผัสของเนื้อยางกับผนังของแม่พิมพ์มากนั้นจะทำให้บริเวณนั้นได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์นานกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ยางเองเกิดการสุกตัวก่อนบริเวณอื่น จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานกับตัวแม่พิมพ์รอยต่อของเนื้อยางที่อาจจะเกิดขึ้นในชิ้นงานซึ่งจะแสดงให้เห็นจุดของยางที่เชื่อมต่อกันซึ่งอาจทำให้บริเวณนี้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น โพรงอากาศ รอยการต่อกันในชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์จะเกิดที่บริเวณผิวแต่ส่วนใหญ่จะ

เกิดภายในผิวของชิ้นงาน การไหลเข้าไปของเนื้อยางนั้นแสดงให้เห็นลักษณะทิศทางของการไหลของอนุภาคของยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์ อนุภาคของยางไหลไปตามช่องทางวิ่งแล้วจึงไหลเข้าไปภายในรูเข้าซึ่งอนุภาคของยางนั้นไหลเข้าไปนั้นใกล้เคียงกันตลอดหน้าตัดของรูเข้า ต่อจากนั้นเนื้อยางจะไหลไปในส่วนหัวของชิ้นงานก่อนแล้วไหลกลับย้อนออกมาที่บริเวณด้านปลายของชิ้นงาน ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าเนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้นจะเต็มทีบริเวณต้นหัวก่อนแล้วค่อยมาเติมส่วนด้านหลังของชิ้นงาน ความดันที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความดันเท่ากับบรรยากาศเนื่องจากภายในแม่พิมพ์นั้นไม่มีแรงดันด้านที่บริเวณผิวหน้าของยางที่ไหลเข้าไปและความดันที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดที่บริเวณรูเข้าของเนื้อยาง ความเร็วของการฉีดยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้น ความเร็วที่เกิดขึ้นภายในช่องทางวิ่งนั้นจะมีค่าสูงและเมื่อเข้าสู่รูเข้าก็จะมีความเร็วที่สูงเช่นกัน ซึ่งความเร็วสูงสุดเกิดที่บริเวณกึ่งกลางของรูเข้า แต่เมื่อยางไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์แล้วความเร็วจะลดลง อัตราการไหลที่เกิดขึ้นภายในยางตอนฉีดนั้นจะเห็นได้ว่าค่าของอัตราการไหลที่เกิดมีค่าที่สูงบริเวณช่องทางวิ่ง และรูเข้า ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณรูเข้า อุณหภูมิของเนื้อยางที่เกิดขึ้นในกระบวนการของการฉีดนั้น เนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้นอุณหภูมิจะอยู่ที่ 130 – 140 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินั้นค่อนข้างที่จะเท่ากันทั้งหมด อุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน

6.1 อุณหภูมิของสไลด์และแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ

อุณหภูมิของสไลด์ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการนั้นอุณหภูมิของตัวสไลด์นั้นจะมีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ และจะมีอุณหภูมิที่ลดลงในส่วนที่สัมผัสกับเนื้อยางจะอยู่ที่ช่วงปลายของสไลด์ เมื่อเนื้อยางเริ่มเข้ามามากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของสไลด์ลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเนื้อยางไหลเข้าไปเต็มแม่พิมพ์ อุณหภูมิในตัวสไลด์จะลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากตัวสไลด์ไปสู่เนื้อยาง เมื่อถึงกระบวนการของการบ่มนั้นอุณหภูมิของตัวสไลด์จะลดลง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นจะค่อยๆลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับตัวชิ้นงานและความร้อนของแม่พิมพ์ถ่ายเทมาให้แก่ตัวสไลด์ไม่ได้เพราะเนื้อยางจะรับความร้อนแทนแต่ในส่วนโคนของสไลด์นั้นยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่เนื่องจากในส่วนนี้เนื้อยางไม่ได้สัมผัสจึงมีความร้อนจากแม่พิมพ์ถ่ายเทให้ ในการทดลองฉีดนั้นเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเนื้อยางบางส่วนจะติดอยู่ที่ด้านปลายของตัวสไลด์เนื่องจากเนื้อยางในส่วนนี้ยังไม่สุกตัวเต็มที่ เพราะอุณหภูมิของตัวสไลด์นั้นจะมีต่ำซึ่งสามารถเทียบได้จากโปรแกรมว่าเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเหลืออุณหภูมิของสไลด์จะลดลงและเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วจุดที่มีอุณหภูมิต่ำในสไลด์เป็นจุดที่เนื้อยางไม่สุกตัว

อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการนั้นอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากได้รับความร้อนจากแท่งให้ความร้อน อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เวลาเริ่มต้นของกระบวนการของการบ่ม จะมีอุณหภูมิที่สูงประมาณ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ในส่วนที่สัมผัสกับเนื้อยางจะอยู่ของแม่พิมพ์จะมีการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ให้แก่เนื้อยาง และที่เวลา 60 วินาทีของการบ่ม นั้นเนื้อยางจะรับความร้อนจากแม่พิมพ์และส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ลดลง ซึ่งเนื้อยางจะรับความร้อนจากแม่พิมพ์จนเนื้อยางสุกตัว

และส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะทำให้อุณหภูมิในตัวแม่พิมพ์จะลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากตัวแม่พิมพ์ไปสู่อากาศ เมื่อกระบวนการบ่มจะสิ้นสุดนั้นอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์จะลดลง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ

6.2 การสุกตัวของชิ้นงาน

การสุกตัวของชิ้นงานนั้นในตอนเริ่มต้นนั้นเนื้อย่างที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์จนเต็มนั้นเมื่อผ่านครั้งแรก ชิ้นงานจากโปรแกรมดูจะเห็นได้ว่าภายในของชิ้นงานนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของการสุกตัวจะมีค่าที่เท่ากันที่ศูนย์ซึ่งดูเมื่อเวลาผ่านไปนั้นเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อย่างนั้นจะเริ่ม เนื่องจากเนื้อย่างได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ แต่บริเวณภายในของชิ้นงานและส่วนที่สัมผัสกับชุดสไลด์นั้นเนื้อย่างจะยังไม่สุกตัว และเมื่อเวลานานขึ้นการสุกของเนื้อย่างนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้น และจะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน และภายในของชิ้นงานจะเริ่มสุกตัวเช่นกันแต่ก็ยังมีส่วนที่ยังไม่สุกตัวอยู่ และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการบ่มนั้นเนื้อย่างจะสุกเท่ากันหมด ในการทำการทดสอบจริงนั้นอุณหภูมิของชุดสไลด์นั้นจะน้อยกว่าในการใช้โปรแกรมเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนขณะที่นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจึงทำให้เกิดการไม่สุกตัวของเนื้อย่างที่บริเวณที่ติดกับชุดสไลด์ซึ่งจะทำให้เนื้อย่างติดกับชุดสไลด์

6.3 โลหะที่เลือกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์

ในส่วนของโลหะที่เลือกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์เป็นเหล็กคาร์บอน (Carbon steel) S45C เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่อความสึกหรอสูง เมื่อใช้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิที่สูงค่าคุณสมบัติต่างไม่เปลี่ยนแปลงมากนักไป เช่น การขยายตัว ซึ่งผลของการขยายตัวของเหล็กที่นำมาสร้างแม่พิมพ์จะมีผลกระทบส่วนต่างๆ มาก เช่น บริเวณหน้าสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง หรือจะมีผลทำให้กลไกการเคลื่อนตัวของชุดสไลด์ติดขัดได้เนื่องการสัมผัสของผิวเหล็กที่พืดกันเวลาเย็นตัว

6.4 ตัวแปรที่ทำการควบคุมในการฉีด

- ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 160°C เนื่องจากทางโรงงานที่ผลิตชิ้นงานยางรองเท้าจักรยานยนต์ในรุ่นนี้ใช้ได้ใช้อุณหภูมิที่ค่า 160°C เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้ยางเกิดการสุกตัวได้ในระยะเวลาที่กำหนด

- การให้ความร้อนแก่เนื้อย่างภายในกระบอกลีดนั้นเป็นการควบคุมให้อุณหภูมิของยางอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด และมีลักษณะเป็นของเหลว แต่เนื้อของจะยังไม่ทำปฏิกิริยา เนื้อยาง NR40 จะให้ความร้อนเริ่มต้นอยู่ที่ 70°C และ เพิ่มมาในช่วงที่ 2 และ 3 เป็น 80°C และในช่วงสุดท้ายก่อนออกจากหัวฉีดจะอยู่ที่ 85°C

เนื้อเยื่อที่ไหลออกมาจากหัวฉีดจะมีอุณหภูมิของเนื้อเยื่อสูงกว่าประมาณ 15-20°C ซึ่งในการฉีดนี้จะอยู่ที่ประมาณ 100°C

- ในการใช้ความดันในการฉีดยางของเครื่องฉีดยางที่ใช้ยูนิตนั้นโดยทั่วไปจะใช้ความดันในการฉีดที่ 80 - 90 บาร์เซ็นต์ ของความดันสูงสุดที่เครื่องสามารถทำได้ ความเร็วของสกรูที่ใช้ในการฉีดคิดเป็น 35 บาร์เซ็นต์ ของความเร็วสูงสุด
- เวลาที่ใช้ในการฉีดและการบ่มเนื้อเยื่อนั้นจะใช้เวลาในการฉีดที่ระยะกระบอกฉีด 25, 40, 50, 75, 90 และ 120 บาร์เซ็นต์ ที่ 1.02, 1.49, 1.83, 2.69, 3.18 และ 4.19 วินาที ตามลำดับ และใช้เวลาในการบ่มเนื้อเยื่อที่ 300 วินาที

6.5 การใช้งานโปรแกรม 3D-SIGMA

จากการใช้งานโปรแกรม 3D-SIGMA ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของยางในแม่พิมพ์นั้น โปรแกรมมีความสามารถและมีส่วนสนับสนุนที่ครอบคลุมการใช้งานแม่พิมพ์ในลักษณะต่างๆ โดยสรุปการใช้งานในแต่ละส่วนได้ดังนี้

1) Preprocessor

ส่วนของ Preprocessor เป็นส่วนในการสร้างแบบแม่พิมพ์ (Mold Layout) ซึ่งโปรแกรมนำเข้าไฟล์ที่เก็บอยู่ในรูปแบบ STL จากโปรแกรม CAD ต่างๆได้อย่างไม่มีปัญหา และโปรแกรมยังสามารถเพิ่มส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ได้ครอบคลุม เช่น ช่องอากาศ (Air Vent) และแท่งความร้อน (Heater Rod) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ส่วนของ Preprocessor ของ 3D-SIGMA รุ่น 4.4 นั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องการแสดงผลที่ไม่สามารถแสดงผลแบบ 3 มิติได้ โดยโปรแกรมจะแสดงผลภาพใน 4 มุมมอง คือ ด้านหน้า ด้านข้าง ด้านบน และแบบไอโซเมตริก รวมถึงเครื่องมือในการสร้างชิ้นส่วนต่างๆขึ้นมาใหม่นั้นใช้งานยากไม่สามารถสร้างรูปร่างที่ซับซ้อนได้

2) Enmeshment

ส่วนของการแบ่งอีลิเมนต์ (Meshing) สามารถเลือกวิธีแบ่งได้ 4 แบบ คือ 1) Automatic 2) Standard 3) Advanced และ 4) Advanced 2 ซึ่งโปรแกรมสามารถเลือกแบ่งให้ชิ้นงานแต่ละส่วนมีความละเอียดที่ต่างกัน ได้ทำให้สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้ และได้ผลวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากขึ้น

3) Definition

เป็นส่วนของการกำหนดค่าต่างๆของกระบวนการ เช่น วัสดุที่ใช้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ค่าของกระบวนการฉีด และการเก็บผลการวิเคราะห์ เป็นต้น ซึ่งโปรแกรมสามารถวิเคราะห์กระบวนการฉีดหลายๆรอบการฉีดได้ ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากขึ้นเนื่องจากการวิเคราะห์การไหลเพียงรอบเดียวอาจจะได้ผลที่ไม่ถูกต้องนักเนื่องจากความร้อนของระบบแม่พิมพ์ยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล ข้อจำกัดของโปรแกรมในส่วนนี้คือการกำหนดการควบคุมการฉีดของยางเข้าแม่พิมพ์ด้วยอัตราการไหล (Flow Rate) หากต้องการค่าจากการฉีดจริงจะต้องมีการคำนวณก่อนนำมาใช้ซึ่งสามารถผิดพลาดได้

4) Simulation

เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจะแสดงสถานะการวิเคราะห์ให้เห็น และยังสามารถหยุดการวิเคราะห์ชั่วคราวได้

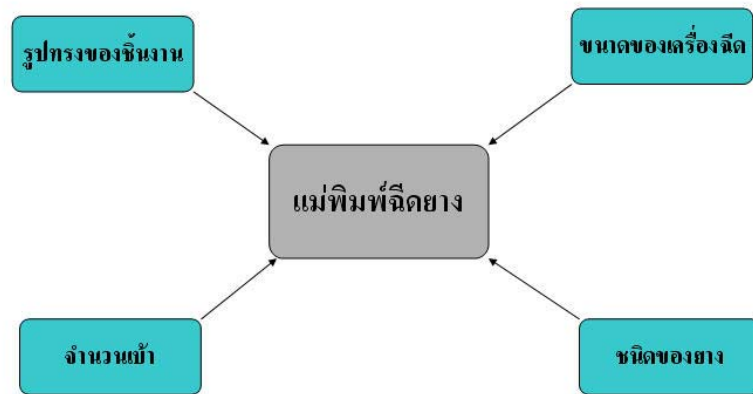
5) Postprocessor

เป็นส่วนการแสดงผลการวิเคราะห์การไหล ซึ่งมีผลที่ได้จากการวิเคราะห์หลายรูปแบบ เช่น แรงดัน นืด ความเร็ว นืด อุณหภูมิแม่พิมพ์และวัสดุ และเปอร์เซ็นต์การสุกของยาง เป็นต้น โดยตัวโปรแกรมมีความยืดหยุ่นในการแสดงผลสามารถเปลี่ยนช่วงความกว้างของผลที่แสดงเพื่อดูผลในบริเวณที่สนใจได้ชัดเจนมากขึ้น สามารถดูผลแบบต่อเนื่องได้ สามารถแสดงผลภายในชิ้นงานได้ อย่างไรก็ตามโปรแกรมไม่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการนืดและชิ้นงานได้ การระบุปัญหาที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน โปรแกรมซึ่งขึ้นกับความรู้อะเอียดและประสบการณ์ของผู้ใช้ ทำให้การระบุปัญหาอาจไม่ครบถ้วน หรือมีความผิดพลาดได้

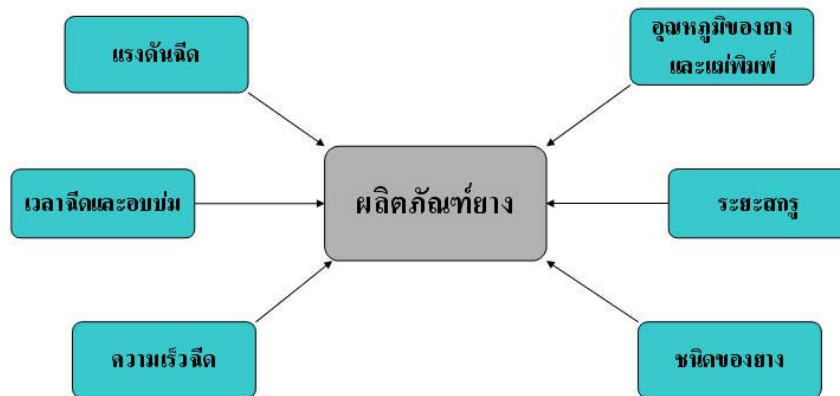
6) Database

โปรแกรม 3D-SIGMA สามารถให้ผู้ใช้งานเพิ่มฐานข้อมูลต่างๆเองได้ สำหรับวัสดุยางนั้นทางโปรแกรมต้องการคุณสมบัติของยาง 5 อย่าง ได้แก่ 1) ค่าของ Heat Conductivity (λ) 2) ค่าของ Density (ρ) 3) ค่าของ Heat Capacity (C_p) 4) ค่าของ Dynamic Viscosity ที่ 3 อุณหภูมิ และ 5) ค่าของ Curing Rate ที่ 3 อุณหภูมิ ซึ่งค่าทั้งหมดนั้นได้จากการทดสอบเนื้อยางในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของยางสามารถเปลี่ยนได้เมื่อมีการเติมสารตัวเติมที่ต่างกัน ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสูตรยางจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทดสอบยางใหม่อีกเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติที่ตรงกับสูตรยาง ซึ่งจะส่งผลต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วย อย่างไรก็ตามผู้ใช้โปรแกรมไม่จำเป็นต้องทราบถึงสูตรของยาง เนื่องจากส่วนใหญ่แล้วสูตรยางนั้นเป็นความลับ หรือลิขสิทธิ์ของทางโรงงานหรือบริษัท นอกจากนี้การเลือกแบบจำลองการไหล (Rheology Model) ยังมีส่วนสำคัญต่อการผลวิเคราะห์อีกด้วย โดยการเลือกแบบจำลองการไหลของวัสดุยางก็อาจจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทหรือชนิด ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้ในเรื่องของการไหล และวิทยาศาสตร์ยางพอสมควร

ผลจากการศึกษากระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยางรองเท้ารถจักรยานยนต์โดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ สามารถช่วยให้ออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น สามารถลดขนาดของทางเข้าทำให้ลดจำนวนวัตถุคิบที่ใช้ลง สามารถทำนายการสุกตัวของยางได้ว่าจุดใดน่าจะมีปัญหาจากการที่ยางไม่สุกตัวทำให้สามารถทราบถึงปัญหาก่อนผลิตจริงได้ และยังสามารถทราบถึงจุดที่อาจจะเกิดการอันของอากาศ ซึ่งอาจจะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เต็ม โดยการวิจัยนี้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวของผลิตภัณฑ์ยางรองเท้ารถจักรยานยนต์ได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยองค์ความรู้ทั้งหมดที่ได้จากโครงการวิจัยนี้สามารถสรุปปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบแม่พิมพ์นืดยาง และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการนืดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ได้ดังแสดงในรูปที่ 151 และ 152



รูปที่ 151 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยาง



รูปที่ 152 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

จากการศึกษาและวิจัยพัฒนาการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAE) การศึกษาได้วิเคราะห์ปัญหา รวมถึงหาแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ เพื่อพัฒนากระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสถานะเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งสามารถสร้างแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพเป็นที่น่าพอใจ รวมถึงได้มีการเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้สู่ผู้ประกอบการแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง และให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการทำให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยางในระดับนานาชาติต่อไป

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะจากทางโรงงาน

ในโรงงานผู้ประกอบการที่ผลิตภัณฑ์ยางรองเท้ารถจักรยานยนต์นั้น ได้ให้คำแนะนำของแม่พิมพ์ที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นในด้านต่างๆ ดังนี้

- การออกแบบช่องทางวิ่งที่ด้านข้างของตัวชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นทรงเรียวจากเล็กมาใหญ่ซึ่งจะทำให้ลักษณะของการไหลเข้าของเนื้อยางภายในตัวแม่พิมพ์มีการไหลเข้าที่เท่ากันทุกชิ้นงาน
- การทำผิวของหน้าประคบของแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างให้มีหน้าสัมผัสที่สัมผัสกันแนบสนิท ซึ่งทำโดยการนำผิวหน้าของแม่พิมพ์ทั้งตัวบนและตัวล่างไปขัดผิวให้เรียบ
- การสัมผัสกันของแม่พิมพ์นั้นควรได้จากชิ้นงานที่เป็นครีบอกมาด้านข้างซึ่งลักษณะของการสัมผัสที่ดีนั้นครีบอกด้านปลายของชิ้นงานควรที่จะมีความหนากว่าด้านต้น

7.2 ข้อเสนอแนะจากทางคณะผู้วิจัย

- ควรศึกษาตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ จำนวนเบ้าพิมพ์ และรูปร่างลักษณะต่างๆ เป็นต้น เพื่อให้งานวิจัยสามารถนำไปใช้แก้ปัญหาได้มากยิ่งขึ้น
- ควรศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์ ชิ้นงานและอากาศ ได้แก่ ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนต่างๆ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความแตกต่างของการใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบแท่งและแบบแผ่น เป็นต้น
- ควรศึกษาการขยายตัวของแม่พิมพ์เนื่องจากความร้อน เพื่อหาค่าความเผื่อ (Tolerance) ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อีกด้วย

8. การเผยแพร่ผลงานโครงการวิจัย

ทางคณะผู้วิจัยมีโครงการเผยแพร่ผลงานวิจัยโดยการจัดหัวข้ออบรมสัมมนาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยาง รวมถึงการนำคอมพิวเตอร์ช่วยในทางวิศวกรรมมาจำลองการไหลของยางขณะฉีดขึ้นรูป โดยทางคณะผู้วิจัยได้เริ่มจัดทำหลักสูตรอบรมสัมมนาแล้วจำนวน 1 หัวเรื่อง คือ “เทคโนโลยีการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์ยาง” โดยนำคู่มือที่ได้จากโครงการวิจัยมาใช้ประกอบการอบรมสัมมนา เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและเป็นการเพิ่มศักยภาพให้แก่บุคลากรในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ยาง รวมทั้งผู้สนใจทั่วไป

8.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้ผู้ประกอบการได้รับการถ่ายทอดองค์ความรู้ใหม่ในด้านการออกแบบผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยางเพื่อนำไปปรับใช้ในการดำเนินงานต่อไป

2. เพื่อให้ผู้ประกอบการในกลุ่มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์มีโอกาสในการพบปะเพื่อเจรจาแลกเปลี่ยนแนวคิด และสร้างพันธมิตรทางการค้า
3. เพื่อให้กลุ่มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์มีการพัฒนาความสามารถในการแข่งขันอย่างเป็นระบบและเป็นเครือข่ายที่เข้มแข็ง และสามารถแข่งขันในเวทีการค้าโลกได้
4. เพื่อค้นหาแนวทางสำหรับสร้างโจทย์วิจัยที่ตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

8.2 กลุ่มเป้าหมาย

1. บุคลากรภาครัฐ

- นักวิจัย
- อาจารย์มหาวิทยาลัย
- นักศึกษาระดับปริญญาตรี โท เอก ที่ทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้อง รวมถึงนักศึกษาที่สนใจ

2. บุคลากรภาคเอกชน

- กลุ่มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง
- กลุ่มอุตสาหกรรมแปรรูปยาง
- หน่วยงานเครือข่ายที่สนใจ

8.3 หัวข้ออบรมสัมมนาในหัวเรื่อง “เทคโนโลยีการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์ยาง”

- กระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยาง
- เทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์
- สาธิตการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์
- แนวคิดและวิธีการดำเนินการ SMED (Single Minute Exchange of Die)
- เทคโนโลยีการใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิต
- สาธิตการตรวจสอบแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิต

ภาคผนวก ก
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์
กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตารางการเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และตารางการเปรียบเทียบแผนงานและผลงานของโครงการวิจัย
แสดงในตารางที่ ค-1 และ ค-2

ตารางที่ ค-1 ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับ

ข้อที่	วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับ
1	เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากงานวิจัย ข้อมูลจากเอกสารและจากอินเทอร์เน็ต ทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง	รวบรวมข้อมูลและเอกสารทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
2	เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหารวมถึงหาแนวทางแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์	ได้รวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์จากโรงงานผู้ผลิต
3	เพื่อพัฒนากระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสถานะเงื่อนไขต่างๆ	ได้นำโปรแกรม 3D-SIGMA มาใช้ในการวิเคราะห์การไหล เพื่อใช้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดยาง
4	เพื่อสร้างองค์ความรู้และเอกสารคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางและทำการถ่ายทอดไปยังบุคลากรรวมถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ในระดับนานาชาติต่อไป	ได้เอกสารคู่มือในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ตารางที่ ค-2 ตารางเปรียบเทียบแผนงานและผลงานของโครงการวิจัย

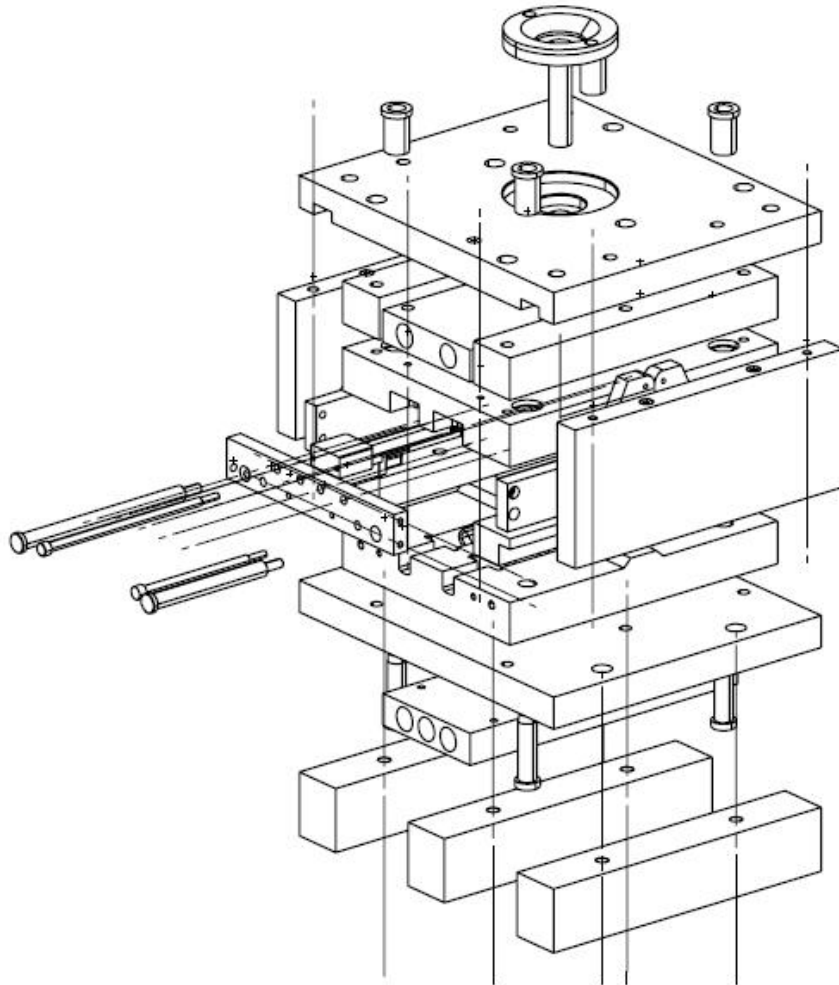
กิจกรรม	แผนงาน	ผลงาน
กิจกรรมที่ 1	วางแผนดำเนินการวิจัย - ประชุมวางแผนความรับผิดชอบ และกำหนดการติดตามงาน	- ได้แผนงานและผู้รับผิดชอบในแต่ละกิจกรรม
กิจกรรมที่ 2	รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ - ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นํ้าคยง - รวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน	- ได้รวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์จากโรงงานผู้ผลิต (ภาคผนวก ก) - การออกแบบแม่พิมพ์นํ้าคยงเบื้องต้น (ภาคผนวก ข) - การใช้งานเครื่องนํ้าคยงเบื้องต้น (ภาคผนวก ค) - การใช้งาน โปรแกรม 3D-SIGMA เบื้องต้น (ภาคผนวก ง)
กิจกรรมที่ 3	เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา - ประสานงานกับบริษัทผู้ร่วมโครงการเพื่อเลือกชิ้นงานที่จะทำการศึกษา	- ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นกรณีศึกษา คือ ที่วางรองเท้ารถจักรยานยนต์
กิจกรรมที่ 4	ออกแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ - ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานที่ต้องการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ - ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA	- แบบชิ้นงาน 3 มิติ สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบแม่พิมพ์ (ภาคผนวก จ) - ผลการวิเคราะห์การไหล และขนาดรูเข้าและทางวิ่งของแม่พิมพ์

กิจกรรมที่ 5	ผลิตแม่พิมพ์ - ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตเพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน - ทำการผลิตแม่พิมพ์ฉีดยาง	- โปรแกรมสำหรับเครื่องจักรในการผลิตแม่พิมพ์ - แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางรองเท้ารถจักรยานยนต์
กิจกรรมที่ 6	ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข - ทดสอบการทำงานของแม่พิมพ์ - ปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของแม่พิมพ์ฉีดยาง	- ชิ้นงานที่วางเท้ารถจักรยานยนต์จากการทดสอบฉีดแม่พิมพ์ - แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางรองเท้ารถจักรยานยนต์
กิจกรรมที่ 7	สรุปผลการวิจัย - อภิปรายผลการวิจัยและจัดทำเป็นเอกสารเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่เกี่ยวข้องกัน - สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย	- ผลการวิจัย
กิจกรรมที่ 8	จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	- รายงานฉบับสมบูรณ์

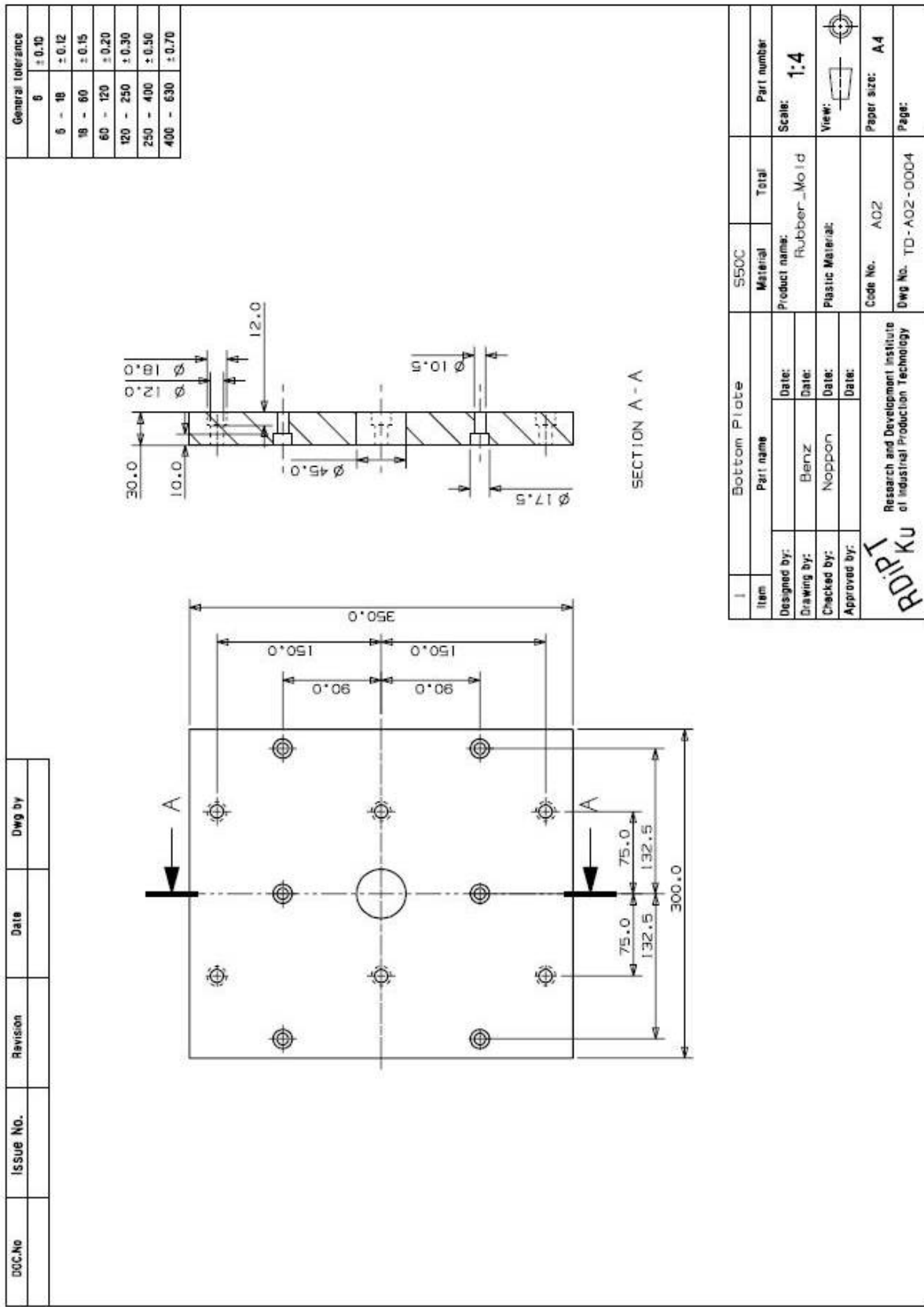
ภาคผนวก ข

แบบแม่พิมพ์จัดขึ้นรูปที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

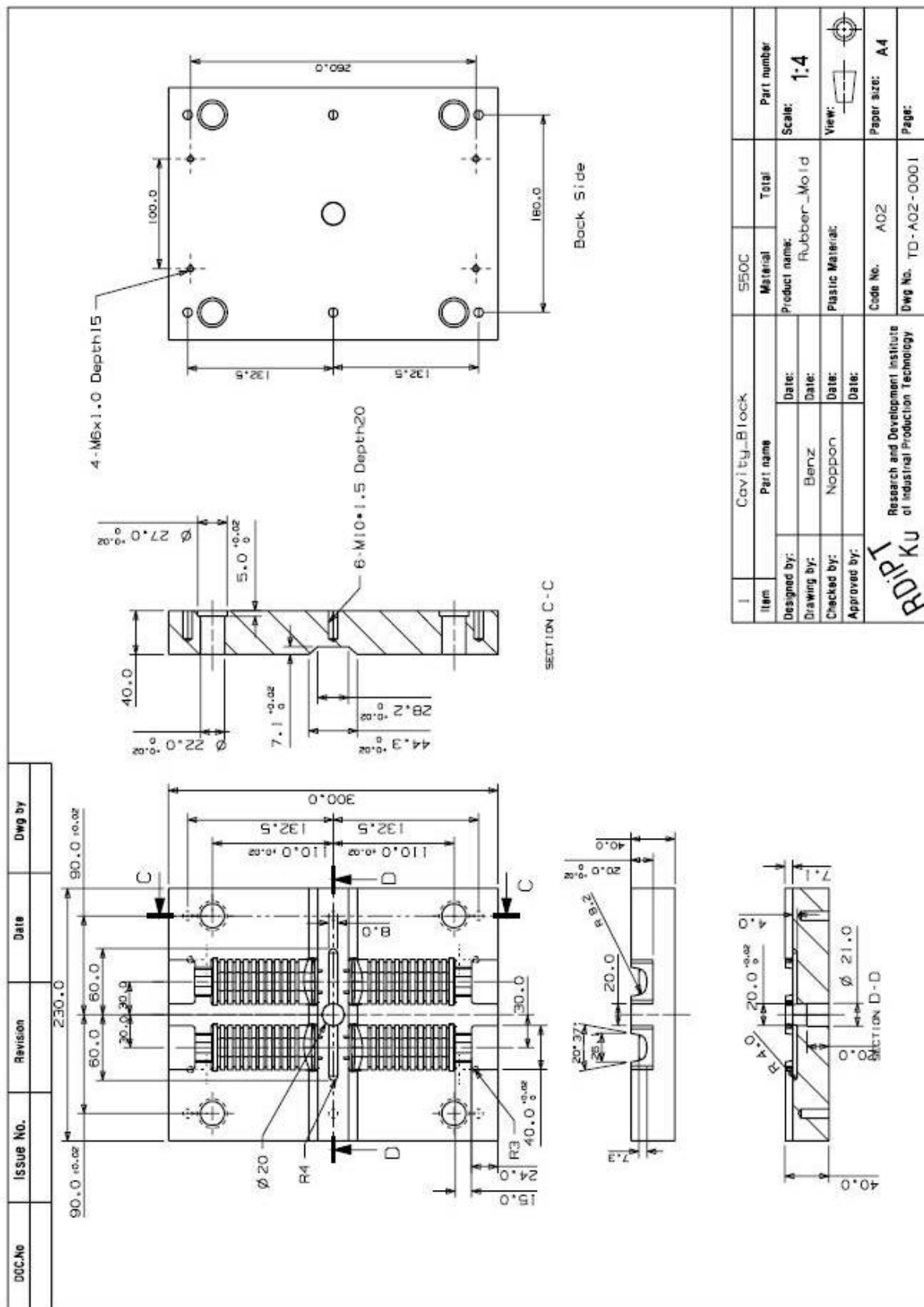
ภาพแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปที่วางเท้ารถจักรยานยนต์ ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ถึง ข-22



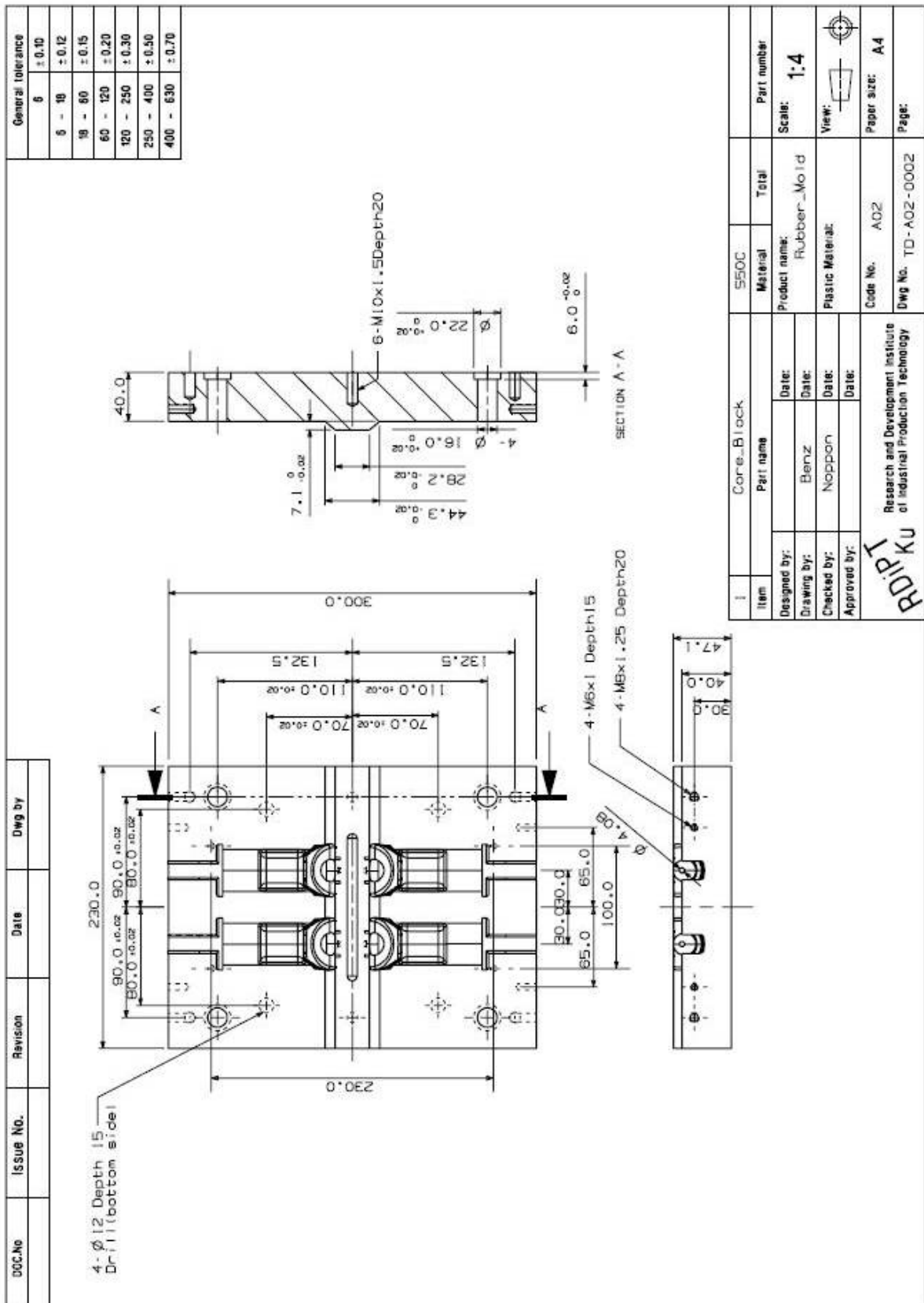
รูปที่ ข-1 แสดงส่วนประกอบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



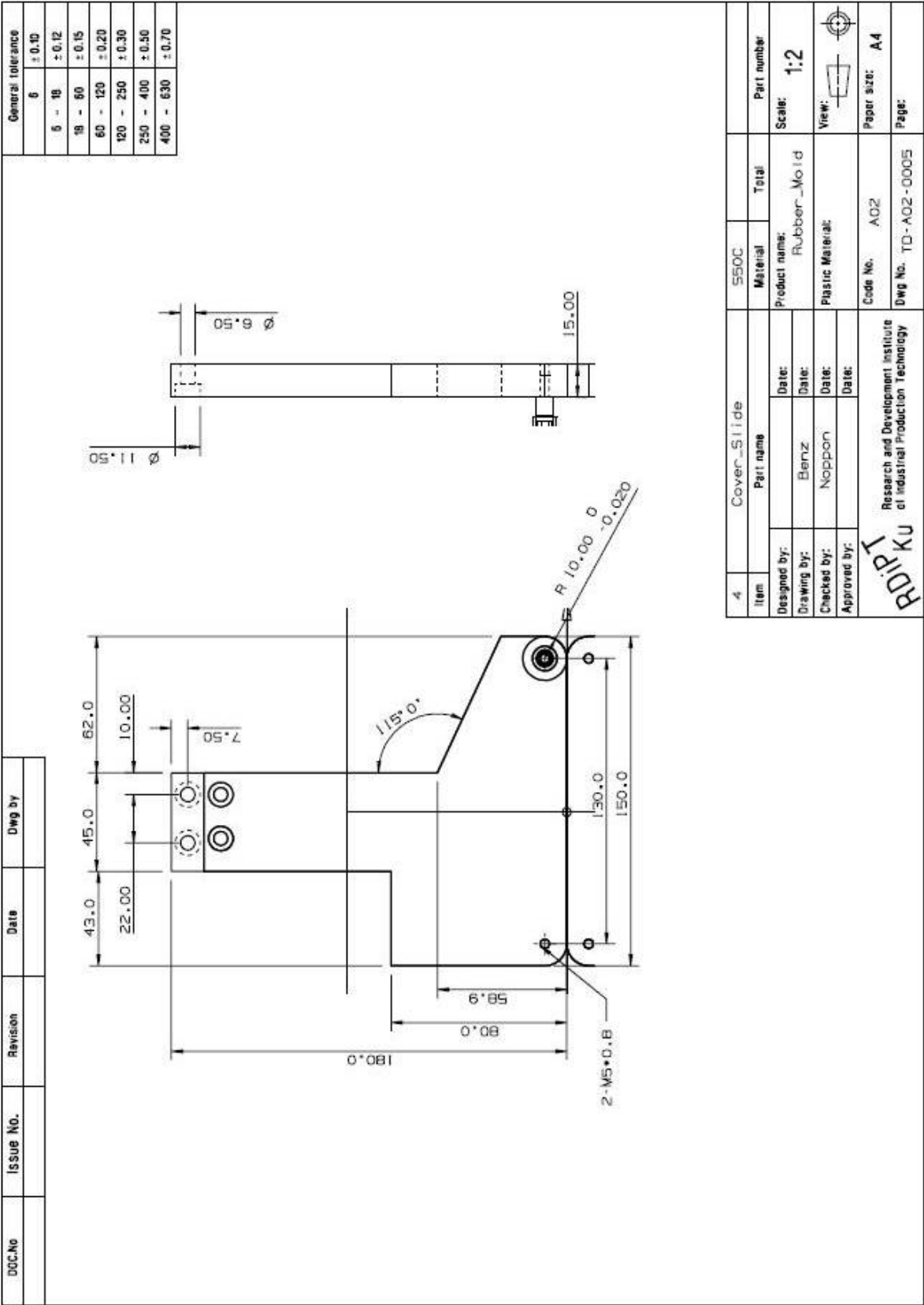
รูปที่ ข-2 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ ข-3 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

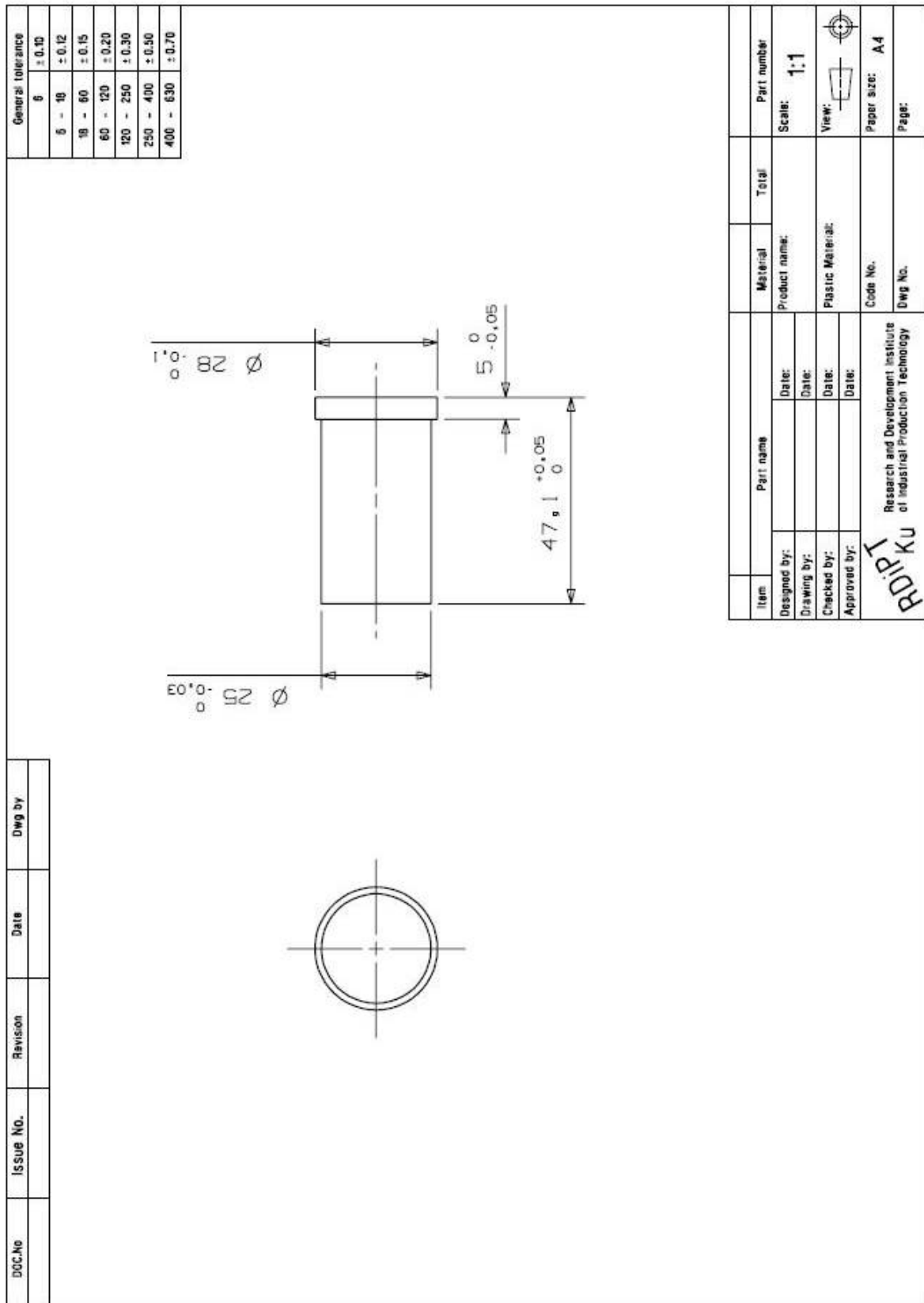


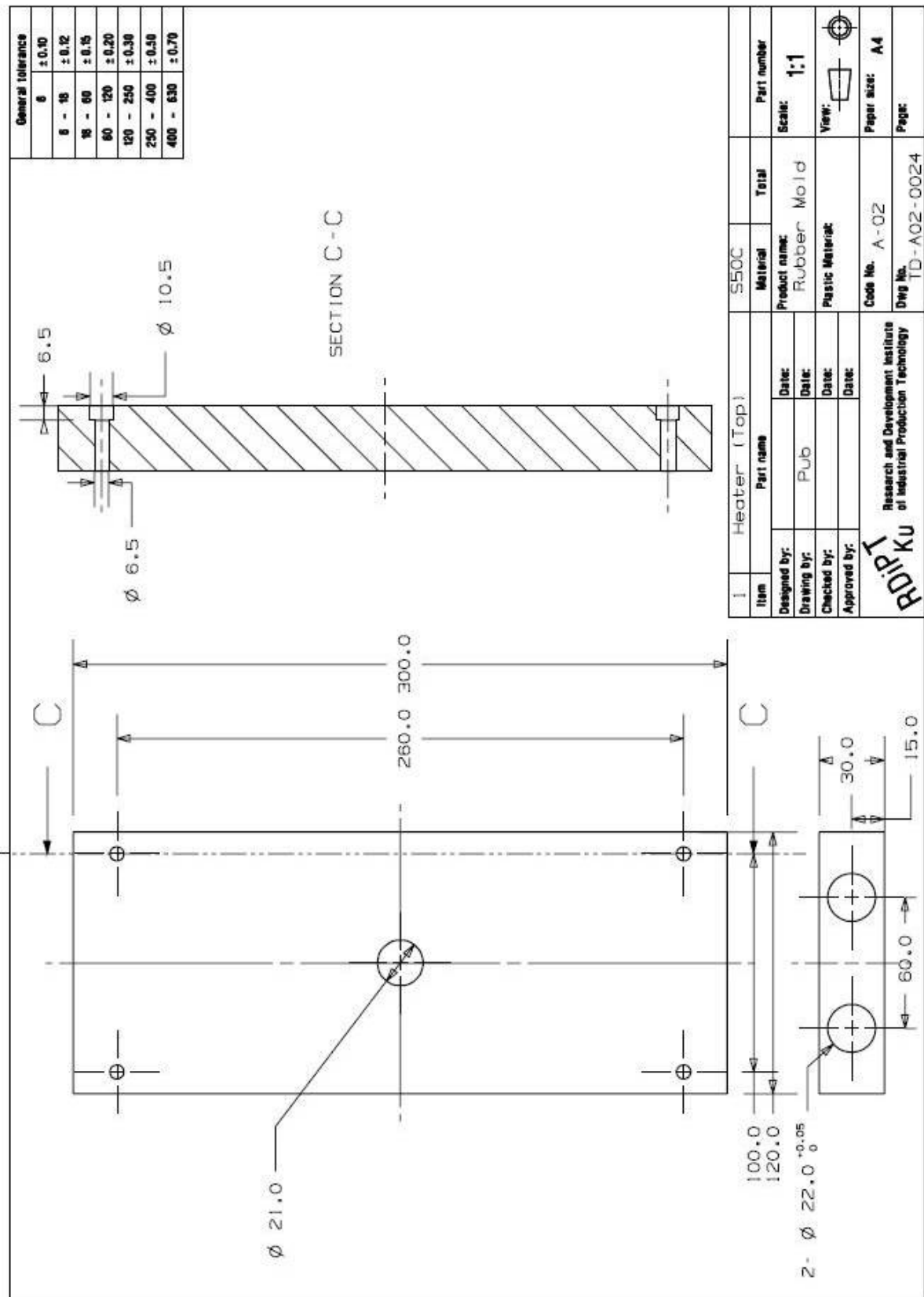
รูปที่ ข-4 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



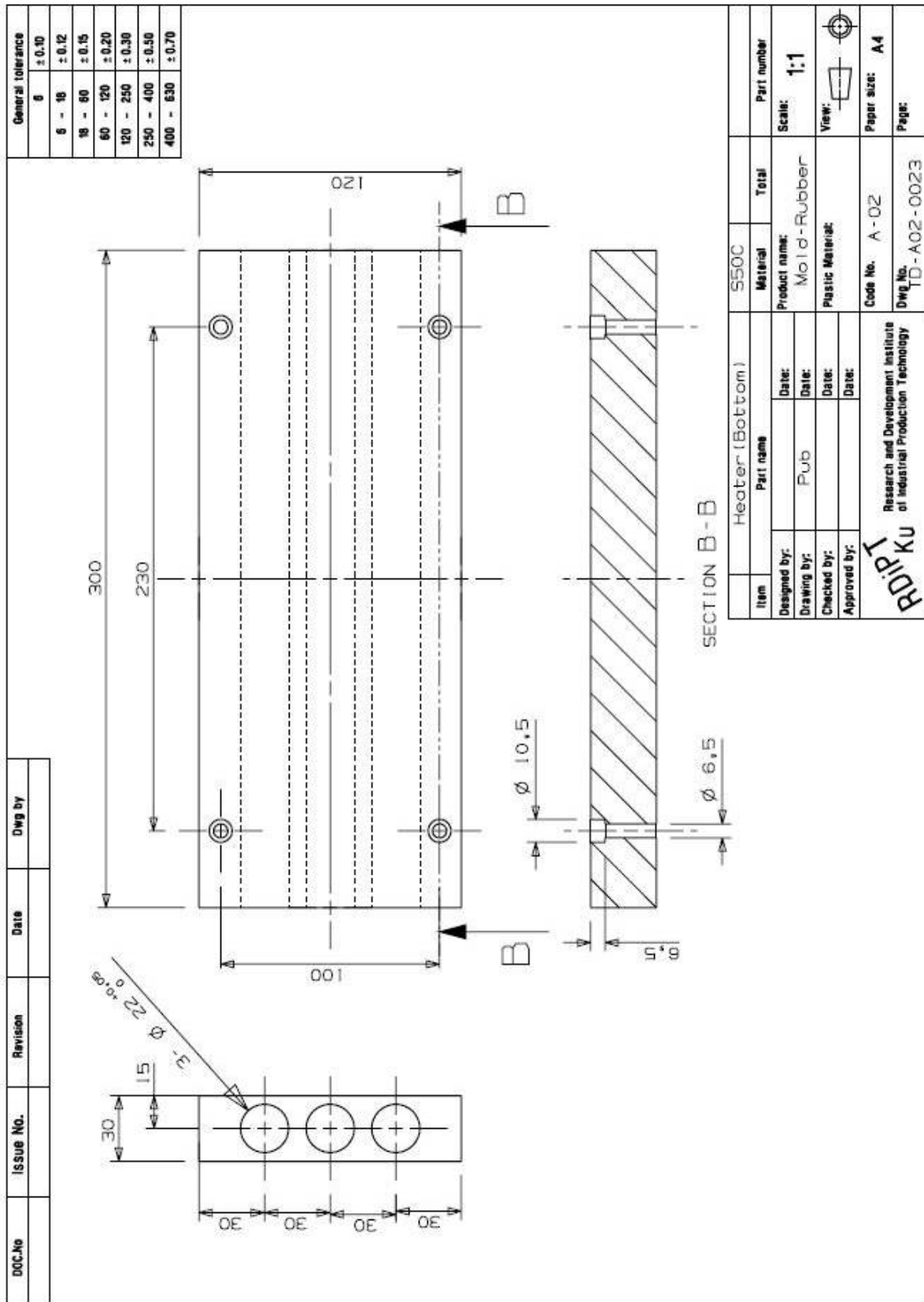
รูปที่ ข-5 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

รูปที่ ข-6 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

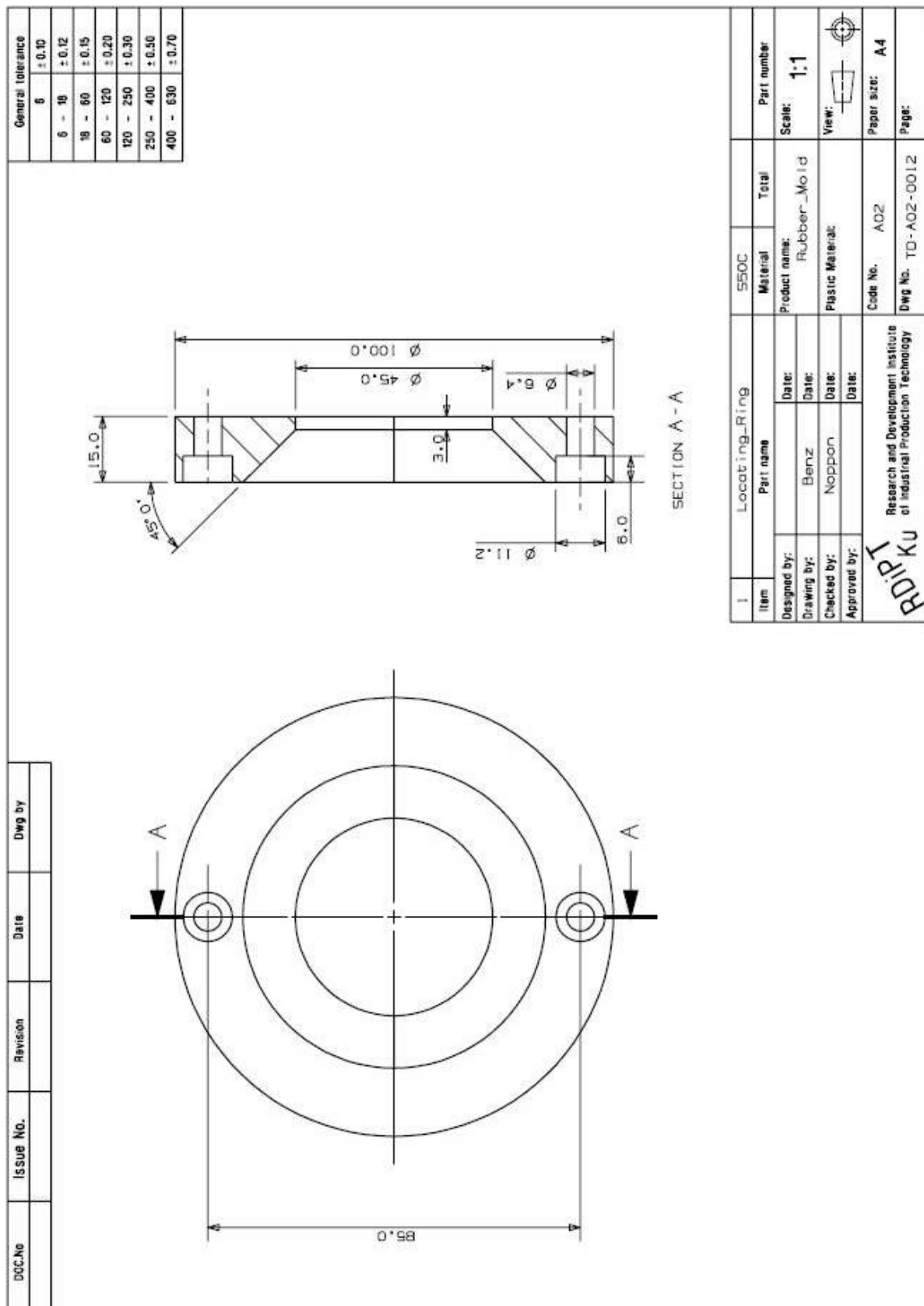




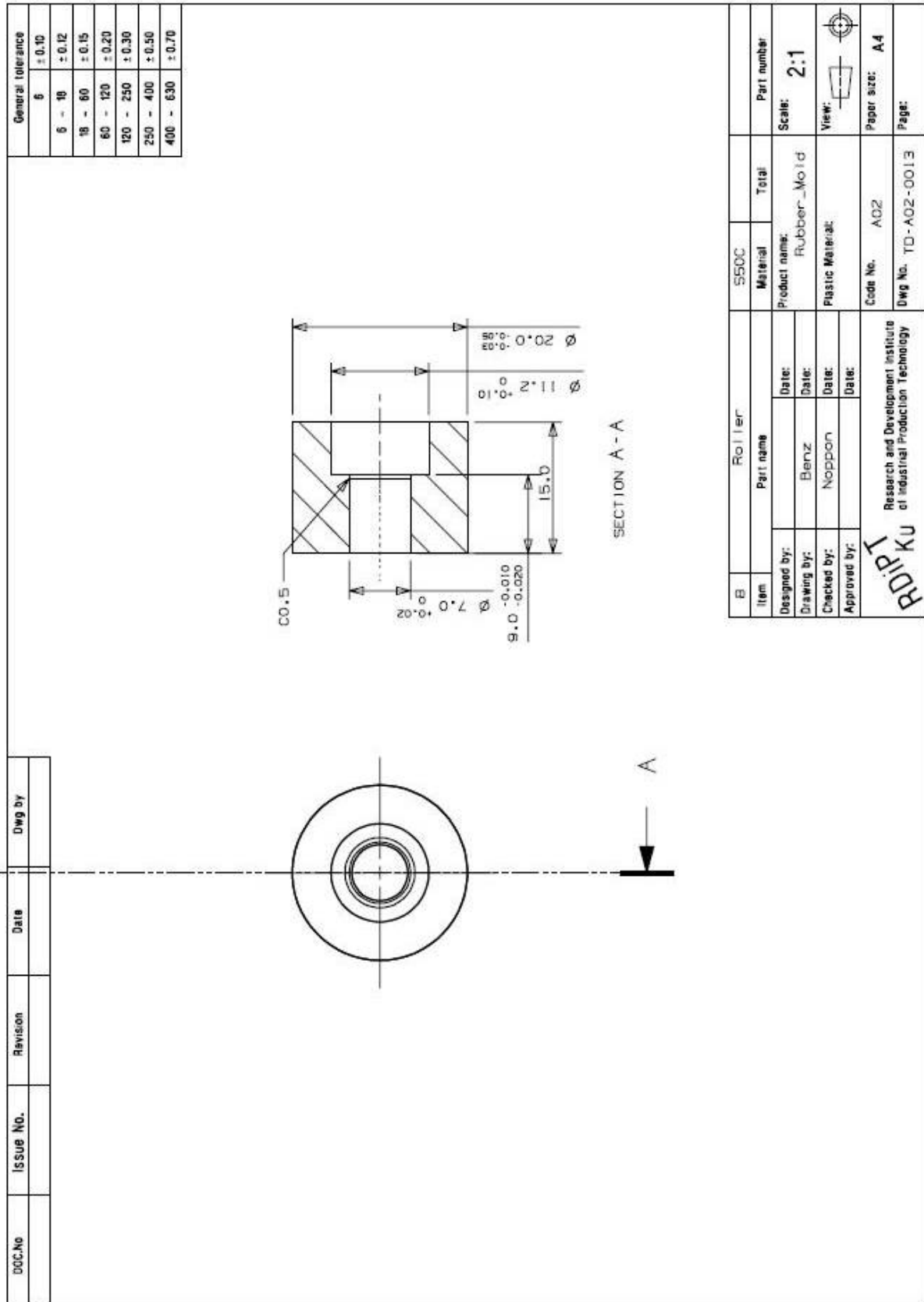
รูปที่ ข-7 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



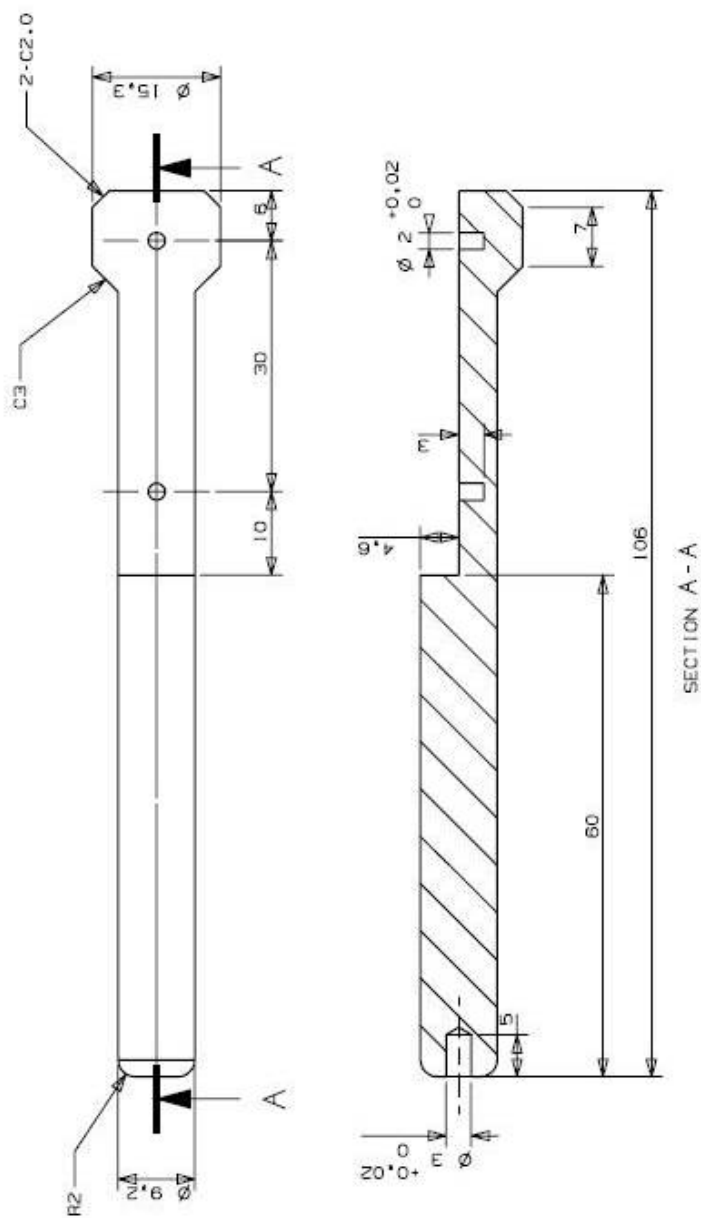
รูปที่ ข-8 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



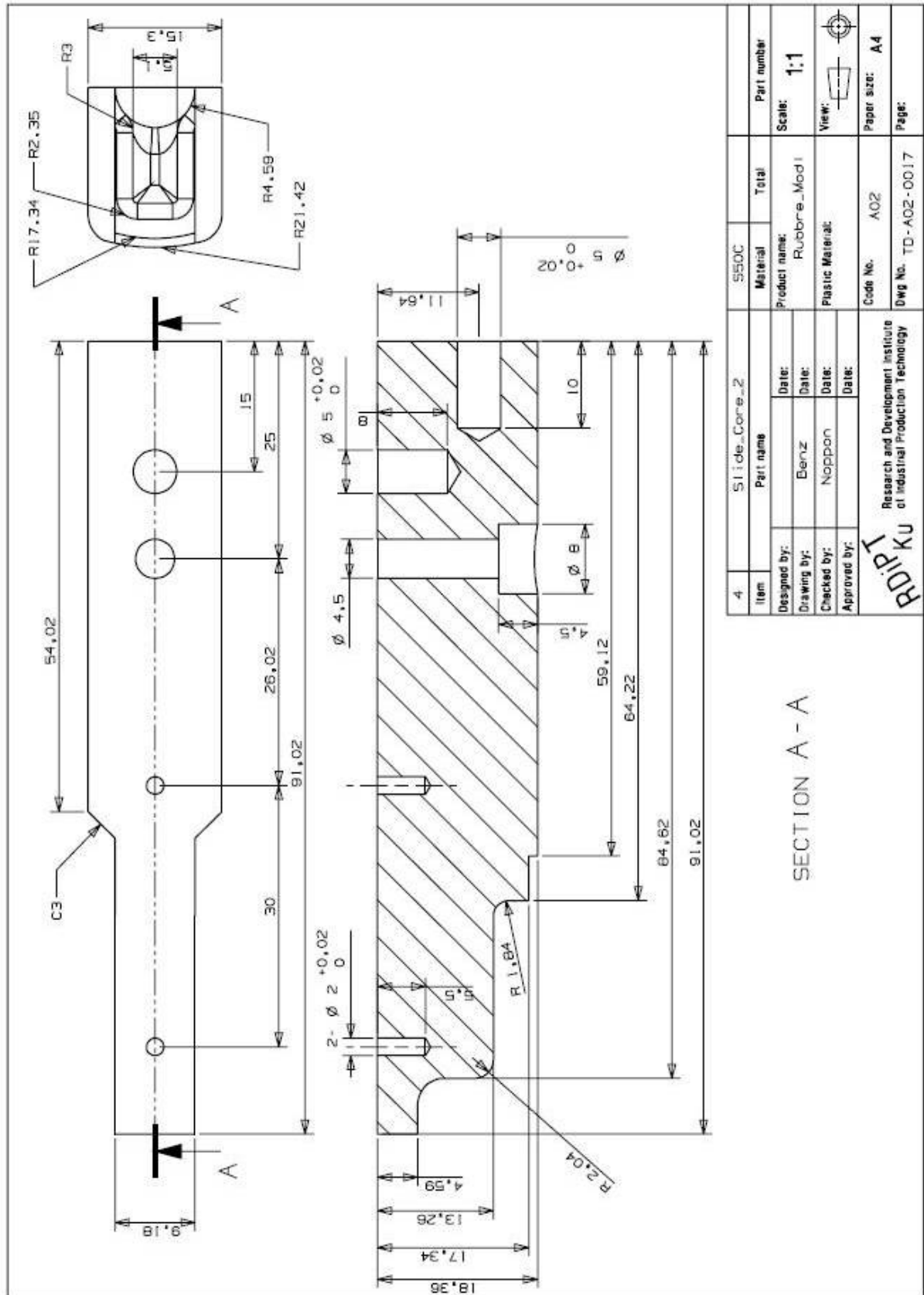
รูปที่ ข-๑ แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



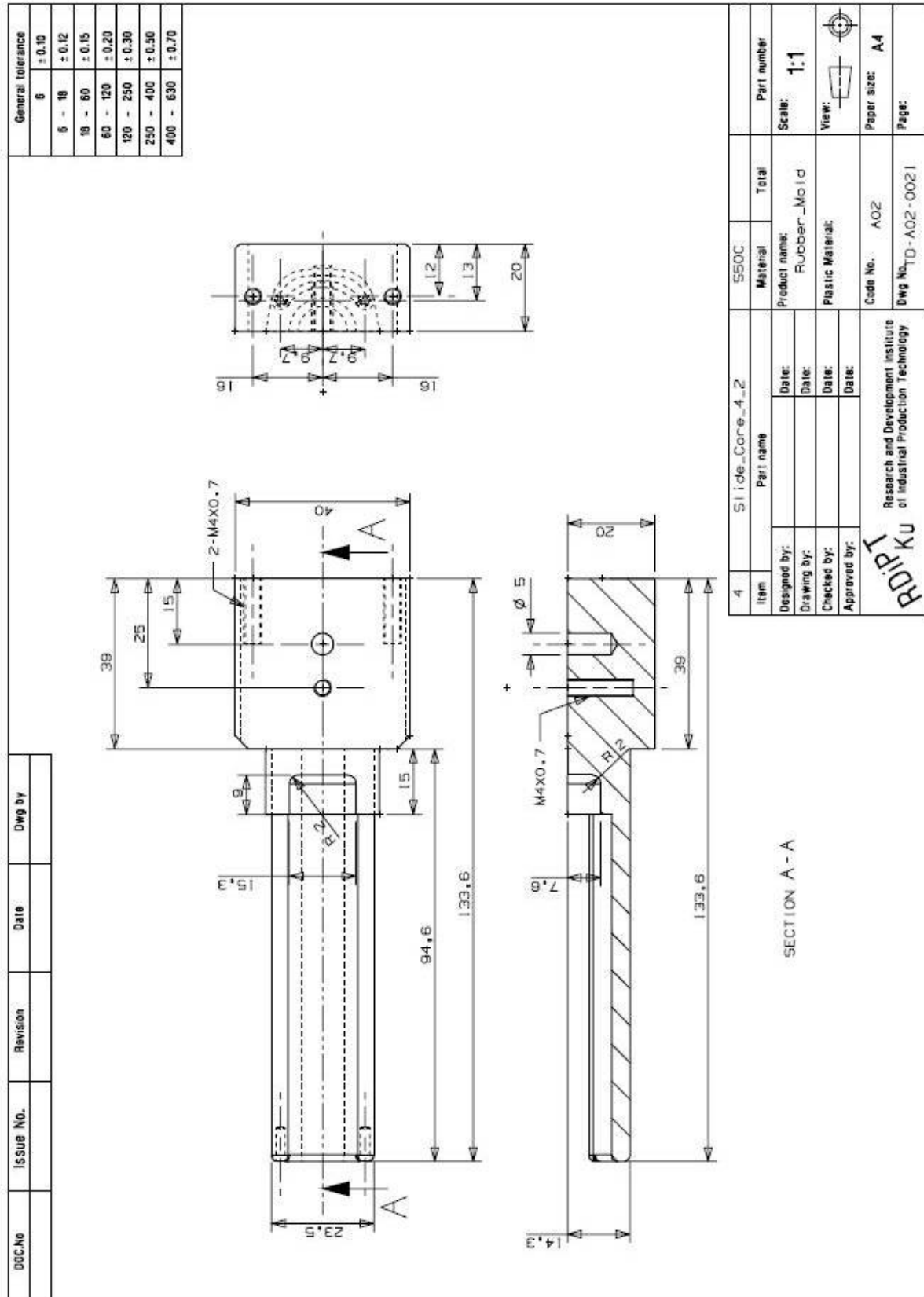
รูปที่ ข-10 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์



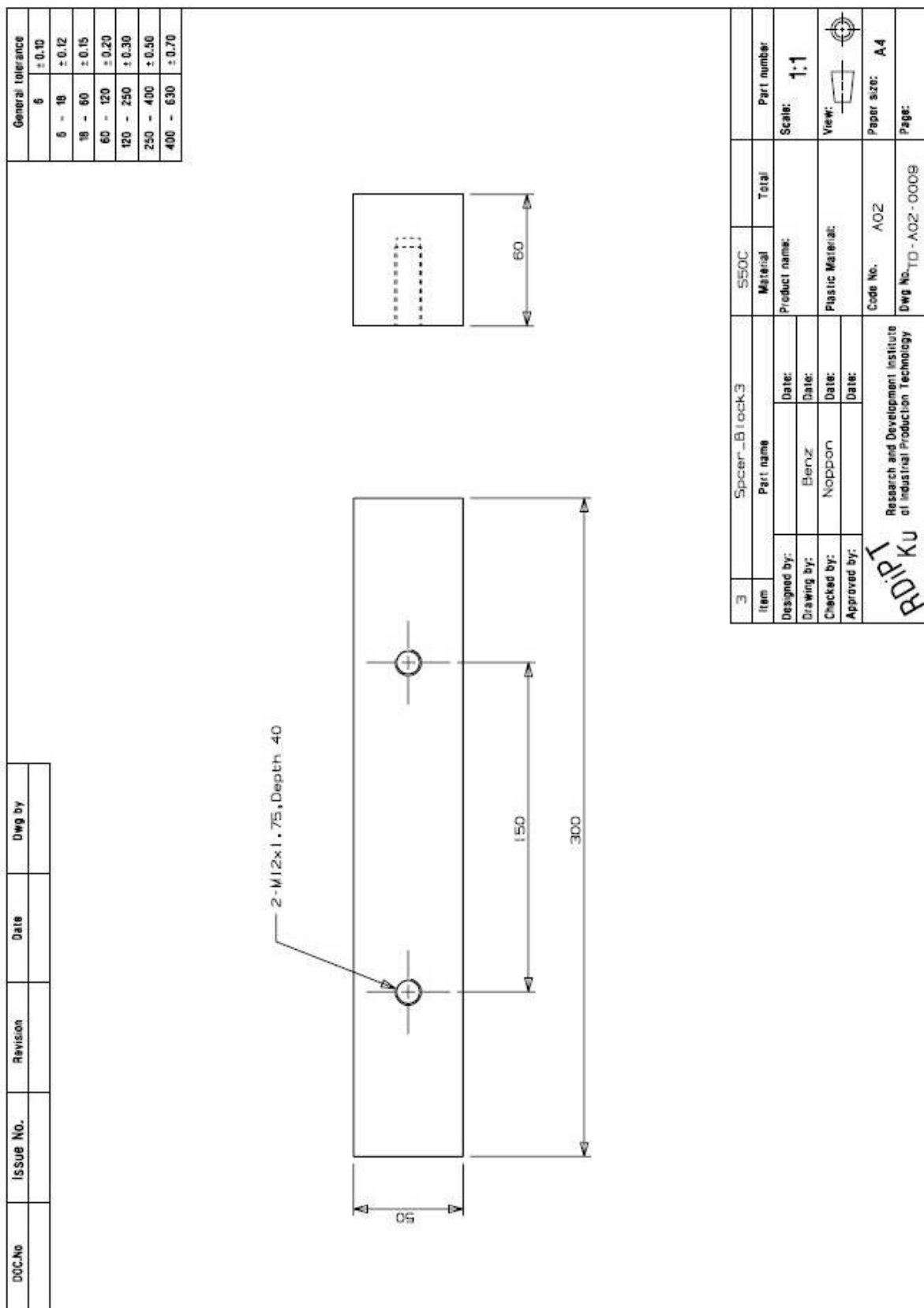
รูปที่ ข-12 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ ข-13 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์

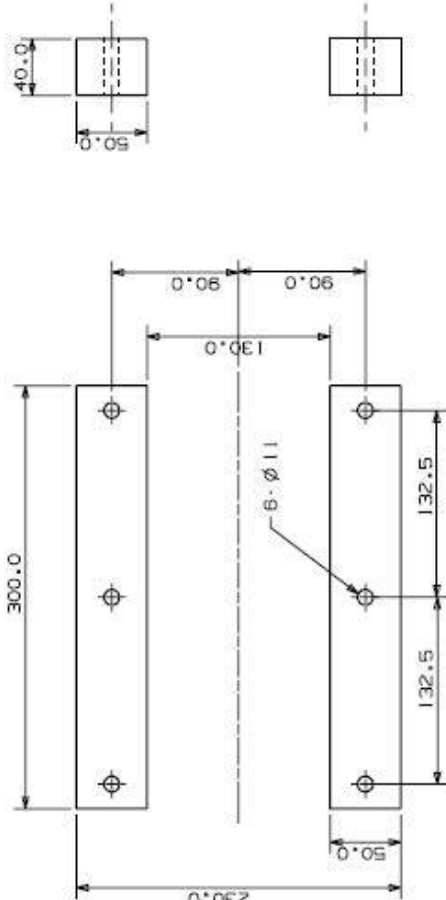


รูปที่ ข-14 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ ข-16 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์

DOC.No.	Issue No.	Revision	Date	Dwg by
---------	-----------	----------	------	--------



General Tolerance	
6	± 0.10
6 - 18	± 0.12
18 - 60	± 0.15
60 - 120	± 0.20
120 - 250	± 0.30
250 - 400	± 0.50
400 - 630	± 0.70

Item	Specer_Block_2		S50C	Material	Total	Part number
Designed by:		Date:		Product name:	Rubber_Mold	Scale: 1:4
Drawing by:	Benz	Date:		Plastic Material:		View: 
Checked by:	Noppon	Date:				
Approved by:		Date:				

R01P1 KU
 Research and Development Institute
 of Industrial Production Technology

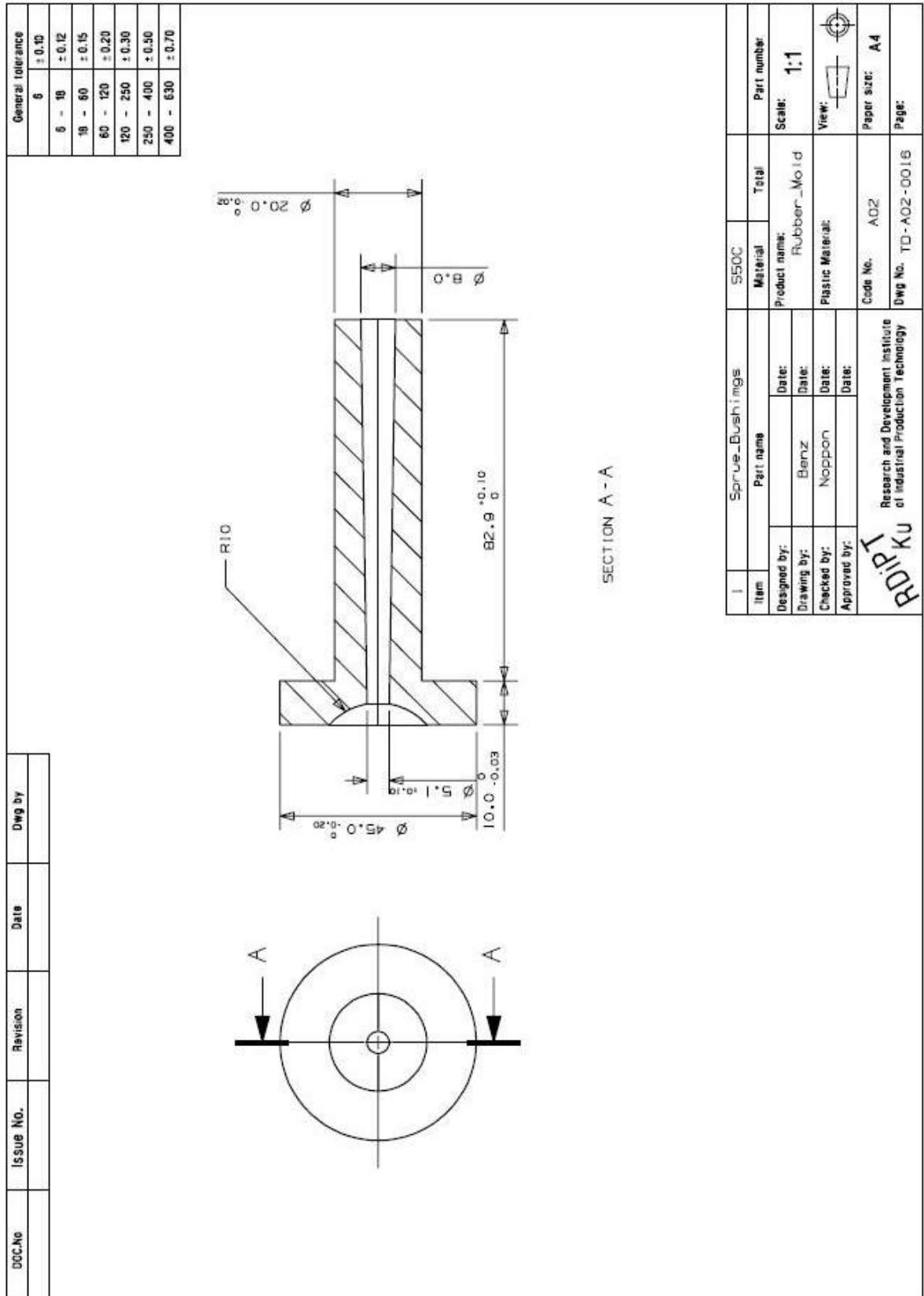
Code No. A02
 Dwg No. TD-A02-0007

รูปที่ ข-17 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

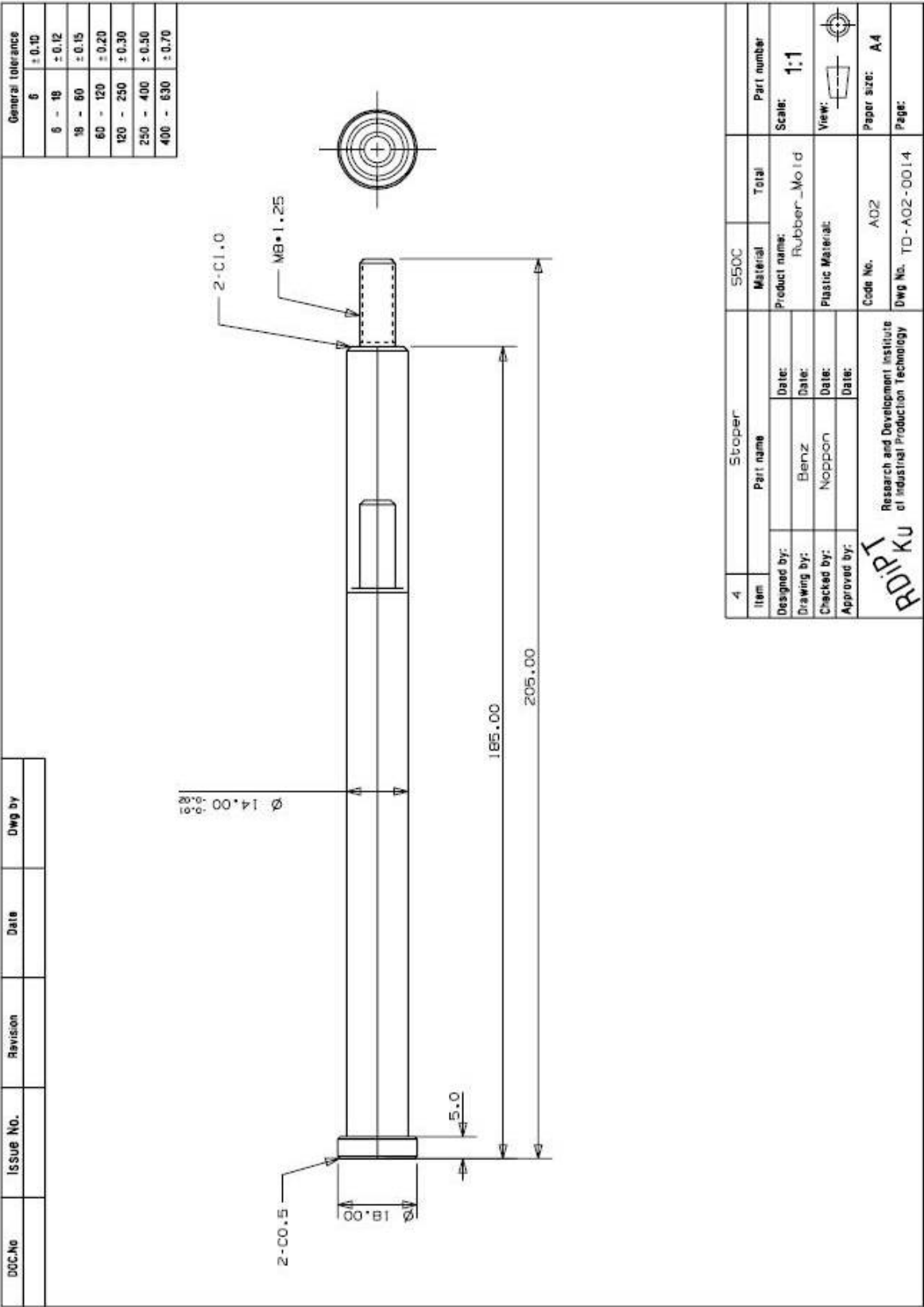
DOC.No	Issue No.	Revision	Date	Dwg by																
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">General tolerance</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>± 0.10</td> </tr> <tr> <td>6 - 18</td> <td>± 0.12</td> </tr> <tr> <td>18 - 60</td> <td>± 0.15</td> </tr> <tr> <td>60 - 120</td> <td>± 0.20</td> </tr> <tr> <td>120 - 250</td> <td>± 0.30</td> </tr> <tr> <td>250 - 400</td> <td>± 0.50</td> </tr> <tr> <td>400 - 630</td> <td>± 0.70</td> </tr> </table>					General tolerance		6	± 0.10	6 - 18	± 0.12	18 - 60	± 0.15	60 - 120	± 0.20	120 - 250	± 0.30	250 - 400	± 0.50	400 - 630	± 0.70
General tolerance																				
6	± 0.10																			
6 - 18	± 0.12																			
18 - 60	± 0.15																			
60 - 120	± 0.20																			
120 - 250	± 0.30																			
250 - 400	± 0.50																			
400 - 630	± 0.70																			

Item	Space_Block_1		550C	Total	Part number
Designed by:	Part name		Material		
Drawing by:	Benz		Product name:	Rubber_Mold	Scale: 1:4
Checked by:	Noppon		Plastic Material:		View:
Approved by:					
			Code No.	A02	Paper size: A4
			Dwg No.	TD-A02-0006	Page:

รูปที่ ข-18 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



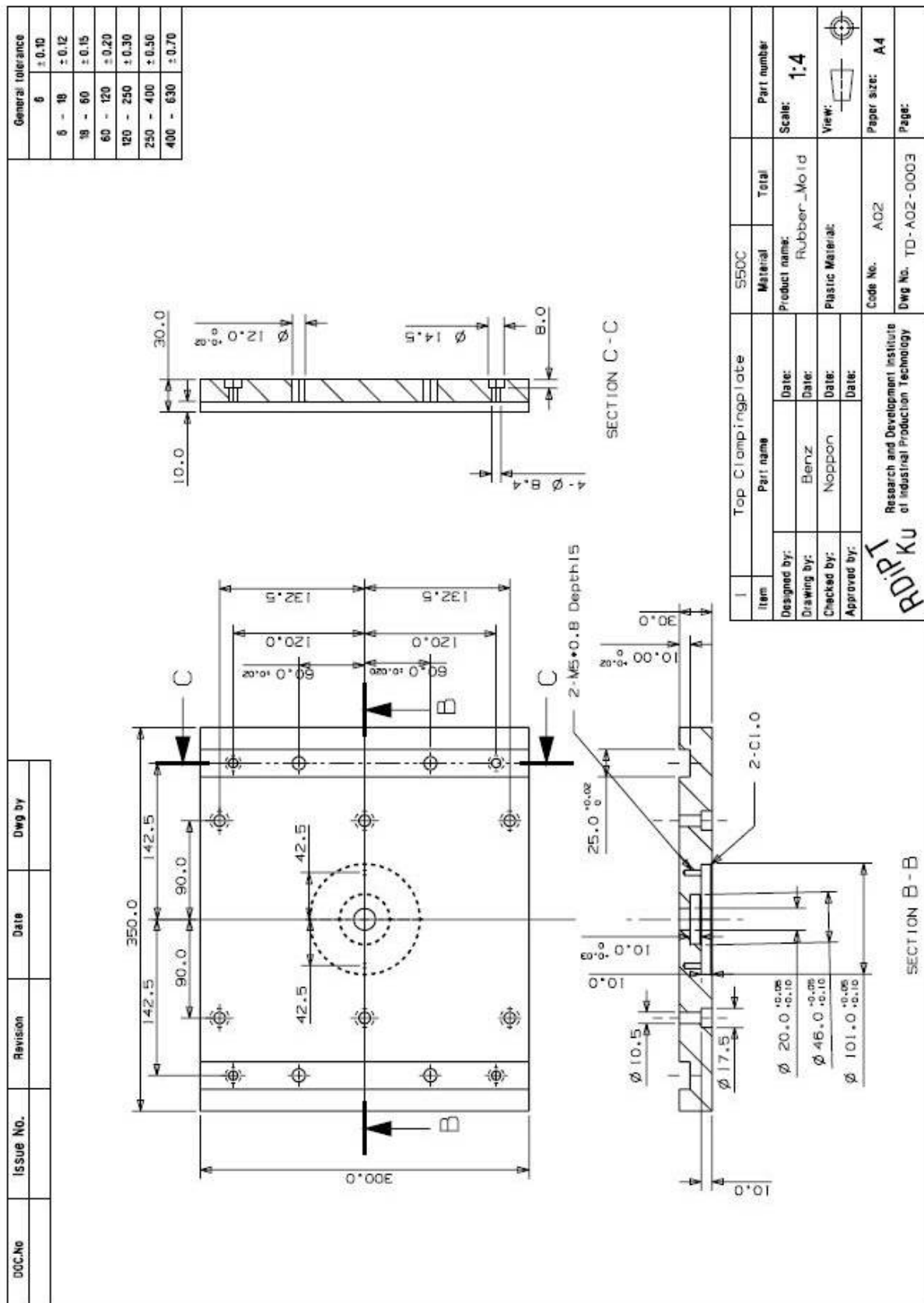
รูปที่ ข-19 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ ข-20 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

[illegible]

รูปที่ ข-21 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ ข-22 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

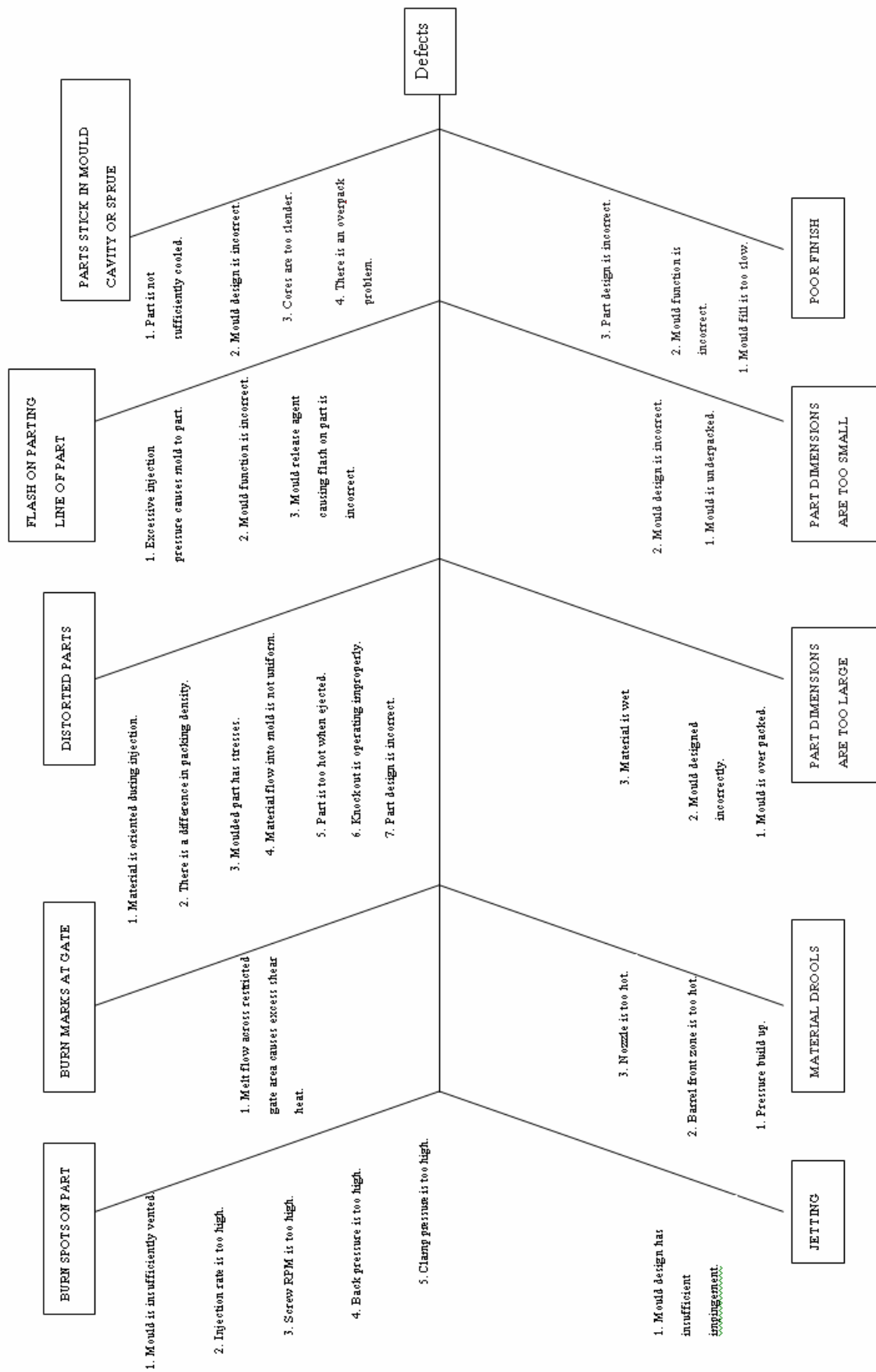
ภาคผนวก ก

ปัญหาและแนวทางแก้ไขของความล่าช้าในการดำเนินงาน

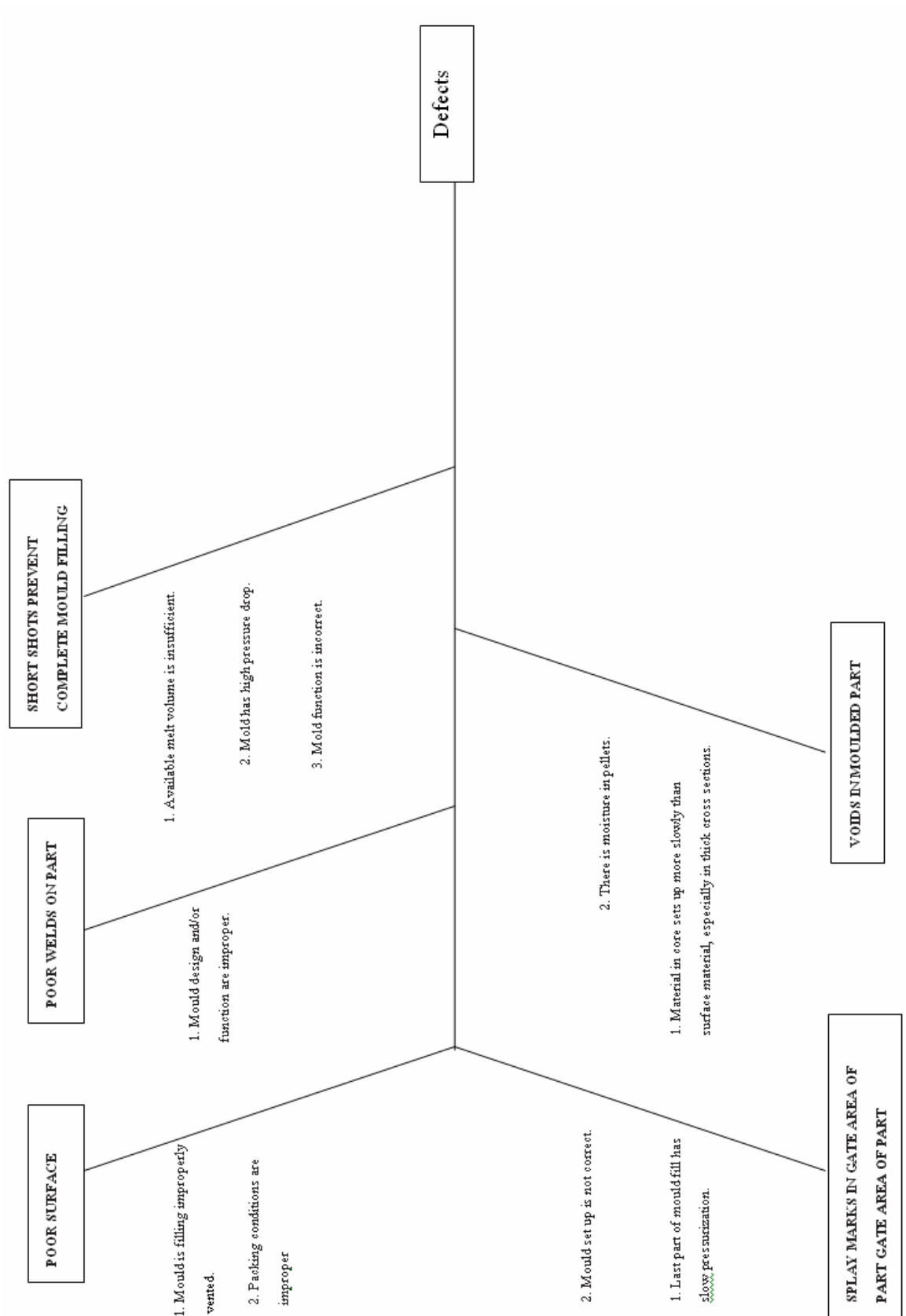
คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาในเรื่องงานล่าช้าดังแสดงในตารางที่ ข-1 และปัญหาในงานฉีดของ
 ชิ้นงานยางโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ปัญหาและแนวทางแก้ไขของความล่าช้าในการดำเนินงาน

ปัญหา	ผลกระทบ	สาเหตุ	แนวทางแก้ไข
1. ความล่าช้าในการ สั่งซื้อ โปรแกรม 3D- SIGMA	ทำให้การดำเนินการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ล่าช้า ส่งผลกระทบต่อ การดำเนินงานขั้นอื่นๆ	เกิดจากกระบวนการสั่งซื้อ ภายในมหาวิทยาลัย	เจ้าหน้าที่ติดตาม ประสานงานอย่างใกล้ชิด ทุกขั้นตอน
2. ปัญหาความล่าช้าใน ขั้นตอนผลิตแม่พิมพ์ (ขั้นตอนการ EDM)	มีผลต่อวันส่งมอบ แม่พิมพ์เพื่อทำการ ทดลองฉีดชิ้นงาน	เนื่องจากเครื่องจักรใน สถาบัน RDiPT มีภาระงาน ค่อนข้างสูงทำให้ว่าง แผนการผลิตทำได้ยาก	นำแม่พิมพ์ออกไปทำการ EDM ภายนอก
3. ปัญหาในระบบสไลด์ ของแม่พิมพ์	ทำให้ไม่สามารถทดลอง ฉีดชิ้นงานได้	ระบบสไลด์ยังทำงานไม่ได้ เต็มประสิทธิภาพ	มีการแก้ไขปรับแต่งใน จุดที่เป็นปัญหา
4. แม่พิมพ์ปิดไม่สนิท เมื่อความร้อนสูง	ไม่สามารถทดลองฉีด ชิ้นงานได้	เนื่องจากความร้อนสูงทำ ให้ชิ้นส่วนเหล็กมีการ ขยายตัว	นำแม่พิมพ์ไปแก้ไขใน จุดต่างๆ ที่มีปัญหา



รูปที่ ค-1 แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการฉีดขึ้นยาง



รูปที่ ค-1 แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการฉีดขึ้นงานยาง (ต่อ)

ภาคผนวก ง

ข้อมูลปัญหาของที่ว่างเพื่อการจักรยานยนต์ที่ได้รับแจ้งจากทางโรงงาน

ข้อมูลปัญหาของที่วางเท้ารถจักรยานยนต์ที่ได้รับแจ้งจากทางโรงงาน รวมถึงแนวทางแก้ไขดังแสดงในตารางที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 ปัญหาของเสียจากการฉีดขึ้นงานยางวางเท้ารถจักรยานยนต์

ลักษณะปัญหา	สาเหตุของปัญหา	แนวทางแก้ปัญา
1. การขาดของชิ้นงานที่บริเวณขอบ (Backrinding) ดังแสดงในรูปที่ ง-1	<u>กระบวนการ</u> - การขยายตัวทางความร้อนของยางขณะเกิดกระบวนการคงรูปจะเกิดมากขึ้นเพราะอยู่ในเครื่องฉีด - การใช้ความดันย่ำ (Holding Pressure) นานเกินไป และจะเกิดมากยิ่งขึ้นถ้าใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง <u>วัตถุดิบ</u> - ยางที่มีสารตัวเติมน้อยจะมีโอกาสเกิดปัญหาได้มากกว่า	<u>กระบวนการ</u> - ลดเวลาในการใช้ความดันย่ำ - การลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ - หรือเพิ่มอุณหภูมิการฉีด เป็นการลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างยางและแม่พิมพ์ ซึ่งจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนลดลง - ทำการคงรูปที่อุณหภูมิต่ำ - ทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์หลังการคงรูปเสร็จ ก่อนที่จะลดความดันลง <u>วัตถุดิบ</u> - ปรับสูตรยาง - ทำการลดอุณหภูมิการคงรูป (T90) ทำการเพิ่มเวลาเริ่มคงรูป (Scorch Time)
2. การฉีดไม่เต็ม (Short Shots) ดังแสดงในรูปที่ ง-2	- ความดันในการฉีดตกลง	<u>กระบวนการ</u> - เพิ่มความเร็วฉีดทั้งหมด - เพิ่มความดันด้านการถอยกลับสกรู (Screw Back Pressure) - เพิ่มความดันย่ำ
	- การออกแบบแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม	- แม่พิมพ์มีหลายเป้าควรออกแบบให้มีระยะทางวิ่งแต่ละเป้าเท่ากัน - ให้แม่พิมพ์มีการระบายอากาศถูกต้อง และช่องระบายอากาศที่สะอาด



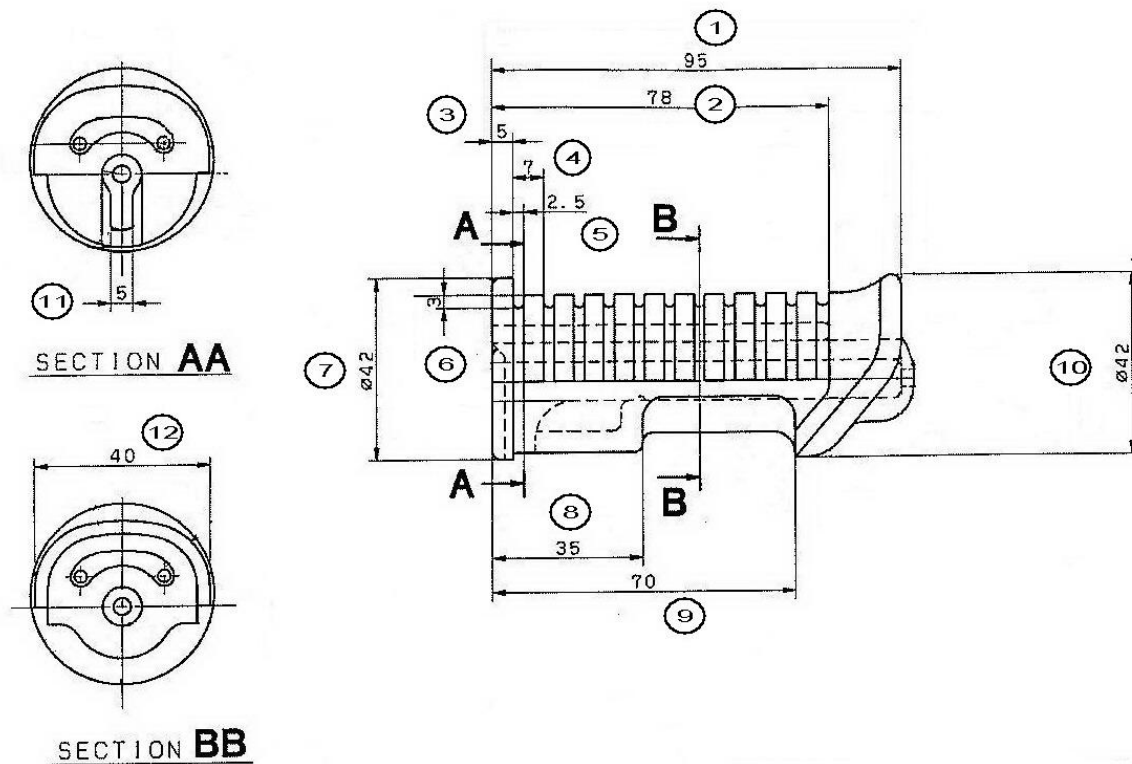
รูปที่ ง-1 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยเกิดการขาดของชิ้นงานที่บริเวณ



รูปที่ ง-2 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจากการฉีดยางไม่เต็มแม่พิมพ์

ภาคผนวก จ

ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน



ตารางที่ จ-1 ตารางเปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานของโครงการวิจัยและชิ้นงานของโรงงาน

Items	Dimension Requirement (mm)	Inspection Instrument	Part Dimension from Research Project (mm)	Error (mm)	Part Dimension from Factory (mm)	Error (mm)	PASS	NO PASS
1	95 ± 1.60	Vernier	95.00	0	95.15	-0.15	✓	
2	78 ± 1.60	Vernier	77.75	0.25	77.80	0.20	✓	
3	5 ± 0.40	Vernier	4.80	0.20	5.15	-0.15	✓	
4	7 ± 0.50	Vernier	7.10	-0.10	6.90	0.10	✓	
5	2.5 ± 0.40	Vernier	2.35	0.15	2.85	-0.35	✓	
6	3 ± 0.40	Vernier	2.60	0.40	2.95	0.05	✓	
7	$\varnothing 42 \pm 1.30$	Vernier	41.70	0.30	41.75	0.25	✓	
8	35 ± 1.00	Vernier	35.50	-0.50	35.40	-0.40	✓	
9	70 ± 1.60	Vernier	70.90	-0.90	70.00	0	✓	
10	$\varnothing 42 \pm 1.30$	Vernier	41.70	0.30	42.40	-0.40	✓	
11	5 ± 0.40	Vernier	5.25	-0.25	5.20	-0.20	✓	
12	40 ± 1.00	Vernier	39.80	0.20	40.10	-0.10	✓	

หมายเหตุ: ค่าพิสัยความคลาดเคลื่อนอ้างอิงจาก ISO3302-1:1996 Class M3 for good-quality mouldings

จากตาราง จ-1 แสดงค่าเปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานของโครงการวิจัยและชิ้นงานของโรงงานจะเห็นว่าค่าคลาดเคลื่อน (Error) ของชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์ที่ผลิตในโครงการวิจัยนี้อยู่ในช่วงค่าพิสัยความเผื่อของชิ้นงาน ดังนั้นชิ้นงานในโครงการวิจัยนี้ผ่านมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพในด้านการวัดขนาด นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากโรงงาน ค่าของขนาดต่างๆ ก็อยู่ในพิสัยความเผื่อเช่นกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่าค่าต่างๆ มีความใกล้เคียงกันและผ่านมาตรฐานทั้งหมด

ภาคผนวก ฉ

บทความสำหรับการเผยแพร่งานวิจัย

**การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม
ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง**
**An Application of Computer Aided Engineering, CAE,
in Rubber Injection Mould Design**

เสกสรรค์ วินยงค์กุล^{1*} สุภสิทธิ์ รอดขวัญ¹ กิตตินันท์ อ้นนันนท์² ชนะ รัชศิริ³ และคุณยุต เอี่ยมสอาด¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-7188 โทรสาร 0-2942-7189 *อีเมล seksanwin@yahoo.com

Seksan Winyangkul^{1*}, Supasit Rodkwan¹, Kittinan Unnanon², Chana Raksiri³ and Kunnayut Eiamsa-ard¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University and

Center of Excellence in Rubber Mould, Research and Development Institute of Industrial Production Technology

²National Metal and Material Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency

(NSTDA), Ministry of Science and Technology, Klongluang, Pathumthani 10210, Thailand,

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Jatujak, Bangkok 10900, Thailand.

Tel: 0-2942-7188, Fax 0-2942-7189, *E-mail: seksanwin@yahoo.com

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมแปรรูปยาง ในประเทศไทยนั้นมักจะใช้ผู้รับจ้างจากภายนอกโรงงานซึ่งทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยอาศัยทักษะความชำนาญของพนักงานปฏิบัติงาน และการลองผิดลองถูก รวมถึงใช้เครื่องมือและเครื่องจักรในการผลิต ต่างๆที่ต้องควบคุมด้วยพนักงาน จึงทำให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ชิ้นงานเกิดริ้วที่มากเกินไปจนความจำเป็น ชิ้นงานมี ฟองอากาศ เป็นต้น ส่งผลให้ต้องมีการแก้ไขแม่พิมพ์และสูญเสียต้นทุน ด้านวัสดุยางโดยไม่จำเป็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำคอมพิวเตอร์ ช่วยงานออกแบบและงานวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในการหาสภาวะ เหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการจำลองการ ไหลของยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ และกำหนดค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง อย่างเช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน อัตรา การเคลื่อน เวลาที่บ่มให้ยางสูง ซึ่งใช้ในการวิจัยนี้คือยางธรรมชาติ

(NR40) และค่าตัวแปรของเครื่องฉีดยางที่ใช้ เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีด เวลาที่ใช้ในการฉีด รวมถึงตัวแปรของตำแหน่ง ช่องทางไหล ช่องทางไหลเข้า จุดที่ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ซึ่งผล การศึกษาที่ได้จากการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์นี้ได้แก่ การ กระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นงาน ความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ทิศทาง ของการไหล เวลาที่ไปถึงของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ และการกระจายตัว ของอุณหภูมิของชิ้นงานยางและแม่พิมพ์ นอกจากนั้นเมื่อนำผลที่ได้จาก การจำลองนี้มาเปรียบเทียบกับกรณีจริงจากเครื่องฉีดและแม่พิมพ์จริงก็ พบว่ามีผลสอดคล้องกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงาน ออกแบบและงานวิเคราะห์เป็นประโยชน์ต่อการหาสภาวะเหมาะสมใน กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

คำสำคัญ คอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบและงานวิเคราะห์ กระบวนการ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

Abstract

Rubber moulds used in the injection moulding process in Thai rubber product industry are usually manufactured by the mould makers who often use skilled and experienced workers with trial-and-error method including conventional tools/ machines in mould design and manufacturing processes. As a result, various defects of the rubber products such as excessive flash and air trap are occurred. This leads to several mould try-outs and loss of raw material used in the process. Therefore, this research aims to apply the Computer Aided Design/ Engineering (CAD/CAE) techniques for optimized injection conditions. The significant input variables include material properties of the natural rubber (NR40) like heat conductivity, viscosity and shear rate, curing time and operating conditions like mould temperature, injection pressure, injection time including the gating and runner positions. The numerical results are also correlated well with the empirical data using the rubber injection machine. This research provides rubber researchers the tools to seek the best operating conditions in injection moulding.

Keywords: Computer Aided Design/ Engineering (CAD/CAE), Rubber Injection Moulding.

1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้วการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมแปรรูปยางในประเทศไทยนั้นมักจะใช้ผู้รับจ้างจากภายนอกโรงงานซึ่งทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยอาศัยทักษะความชำนาญของพนักงานปฏิบัติงาน และการลองผิดลองถูกรวมถึงใช้เครื่องมือและเครื่องจักรในการผลิตต่างๆ ที่ต้องควบคุมด้วยพนักงาน จึงทำให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ชิ้นงานเกิดครีบที่มากเกินไปจนทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศ เป็นต้น ส่งผลให้ต้องมีการแก้ไขแม่พิมพ์และสูญเสียต้นทุนด้านวัสดุยางโดยไม่จำเป็น รวมทั้งการสูญเสียเวลาโอกาสทางการผลิต และแข่งขันทำให้ไม่สามารถสนองความต้องการของตลาดได้อย่างทันทั่วถึง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเบื้องต้นและเป็นส่วนหนึ่งในทางเลือกของการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบและงานวิเคราะห์ (Computer Aided Design/ Engineering, CAD/CAE) มาประยุกต์ใช้ในการหาสภาวะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

2. วัสดุและขั้นตอนการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการวิจัยได้ศึกษาชิ้นงานที่วางเท้าโดยใช้ยาง NR 40 ตัวอย่างของชิ้นงานวางเท้าจักรยานยนต์พร้อมทั้งแบบ CAD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ยางที่วางเท้าที่ใช้ในการเหยียบเบรกในรถจักรยานยนต์

ในทดสอบใช้เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) ยี่ห้อ NISSEI รุ่น TH100-25VSR ขนาด 100 ตันและมีปริมาตรกระบอกฉีด 254 ลูกบาศก์เซนติเมตร ของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2

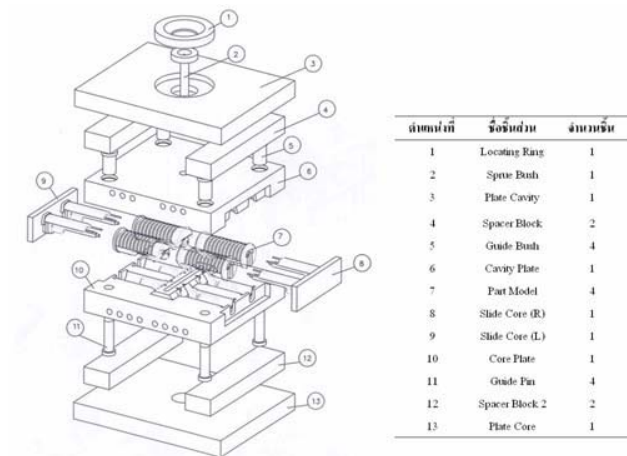


รูปที่ 2 เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้งขนาด 100 ตันและมีปริมาตรกระบอกฉีด 254 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เมื่อทำการเขียนรูปชิ้นงานเสร็จจึงแสดงในภาพที่ 1 จากนั้นทำการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดในการทดสอบกับเครื่องฉีดยางดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งจะมีจำนวนของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์อยู่ 4 ชิ้นงาน โดยมีชุดอินเสิร์ท (insert) อยู่ทั้งสองด้านของแม่พิมพ์ และจะทำการเลื่อนเข้าเมื่อแม่พิมพ์ได้ทำการปิดตัวลงโดยอาศัยแผ่นนำร่องในการเข้าประกบ และจะเปิดตัวออกเมื่อแม่พิมพ์ได้ทำการยกตัวขึ้น และใช้พินในการนำร่อง [1] ในการประกบกันของแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง ส่วนการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์นั้น ได้ใช้แท่งให้ความร้อนจำนวน 4 แท่งแบ่งด้านบนและด้านล่างอย่างละ

สองแท่งซึ่งแท่งให้ความร้อนมีขนาด 10 มม. ส่วนช่องทางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นจะเป็นช่องทางไหล (gate) เข้าแบบหวี ซึ่งจะทำให้น้ำยางไหลเข้าบริเวณด้านข้างของแม่พิมพ์ จากนั้นนำมาจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA [2]

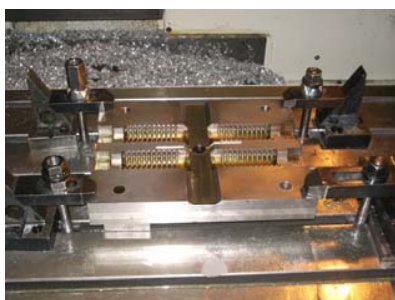
จากนั้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 3 แม่พิมพ์ฉีดที่ทำการออกแบบ



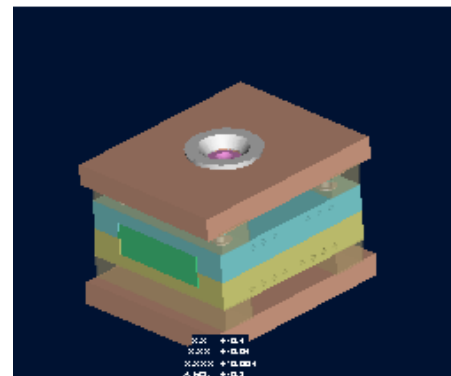
รูปที่ 4 แม่พิมพ์ฉีดตัวบน และตัวล่าง



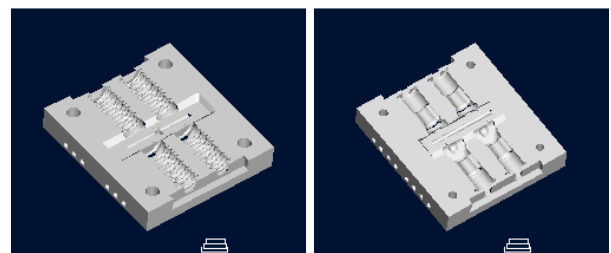
รูปที่ 5 การสร้างแม่พิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบไว้

2.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นตอนแรก คือ Preprocessor เป็นการเปิดไฟล์แบบชิ้นงานที่ได้จัดเก็บไว้ในรูปแบบ STL File ทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งมีส่วนประกอบ ได้แก่ แผ่นแม่พิมพ์บน (Cavity Plate) ดังแสดงในรูปที่ 7 แผ่นแม่พิมพ์ล่าง (Core Plate) แท่งความร้อน (Heater Rods) ช่องฉีด (Inlet) และอนุภาคยาง (Tracer) จากนั้นทำการกำหนดส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ให้โปรแกรมรับรู้



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ทั้งหมดที่ออกแบบไว้



รูปที่ 7 รูปทรงของแม่พิมพ์ที่เขียนขึ้น

หลังจากเสร็จสิ้น Preprocessor ก็จะมีการแบ่งอิลิเมนต์ (Elements) คือการแบ่งชิ้นงาน และแม่พิมพ์ออกเป็นลักษณะทรงลูกบาศก์เล็กๆ ขั้นตอนนี้เรียกว่า Enmeshment ซึ่งตัวโปรแกรมจะมีการแบ่งได้ 4 แบบ คือ 1) Automatic 2) Standard 3) Advanced และ 4) Advanced 2 ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกการแบ่งอิลิเมนต์แบบ Advanced 2 เพราะสามารถเลือกแบ่งระดับความละเอียดให้แต่ละส่วนได้ทำให้ค่าการวิเคราะห์ที่ได้แม่นยำมากขึ้น เช่น ในส่วนของรูเข้าซึ่งมีขนาดเพียง 0.5 มม. ขนาดของอิลิเมนต์จึงต้องเล็กกว่าส่วนอื่นๆ เป็นต้น

ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการกำหนดวัสดุ และค่าต่างๆ ของกระบวนการฉีด วัสดุที่ใช้กับชิ้นงานจะเป็นวัสดุที่ใช้กับผลิตภัณฑ์จริง คือ ยางธรรมชาติ (NR-40) ซึ่งไม่มีในฐานข้อมูลของ

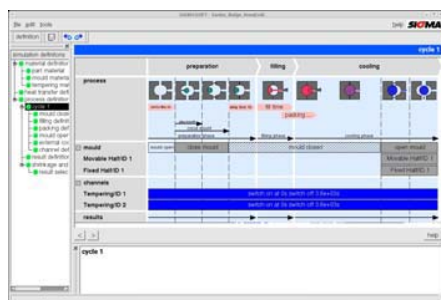
โปรแกรมจึงต้องนำขงไปทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติบางประการที่จำเป็นในการวิเคราะห์ของโปรแกรม ซึ่งค่าที่จำเป็นได้แก่ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature) และข้อมูลที่ต้องการของการสร้างฐานข้อมูลภายในโปรแกรมของขง NR 40 ได้แก่

- ค่าการนำความร้อน (Heat Conductivity, Lambda)
- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Density, Rho)
- ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity, Cp)
- ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (Viscosity as Function of Shear Rate)*
- อัตราการบ่มที่ขึ้นกับเวลา (Curing Rate as Funtion of Time)*

* ในการทดสอบนั้นควรจะทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่าและในแต่ละช่วงของอุณหภูมิหนึ่งควรมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 15 ค่า

ในกระบวนการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองการไหลของกระบวนการนั้นจะต้องกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์ และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์ ต่อจากนั้นทำการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่ (Part/Mould-350 (W/m2K), Mould/Mould-10,000 (W/m2K)) ในการกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหลนั้นจะแบ่งออกเป็น 5 ช่วงเวลาที่จำเป็นต้องกำหนดค่าลงไปโปรแกรมได้แก่ซึ่งเวลาทั้งหมดนี้จะรวมกันอยู่ในหนึ่งไซเคิลการทำงานซึ่งสามารถกำหนดค่าต่างๆลงไปได้ดังรูปที่ 8

- เวลาเริ่มต้นก่อนการฉีด (Lead Time)
- เวลาที่ใช้ในการฉีด (Filling time)
- เวลาที่แม่พิมพ์เคลื่อนตัวมาประกบ (Movable Part)
- เวลาที่แม่พิมพ์อยู่กับที่ขณะทำการฉีด (Fix Part)
- เวลาที่นำชิ้นงานออก (Part take out)



รูปที่ 8 แสดงการกำหนดรอบการทำงานที่ต้องการจำลองการไหล

จากนั้นทำการจำลองการไหลของขงที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA และกำหนดค่าตัวแปรของเครื่องฉีดขงที่ใช้

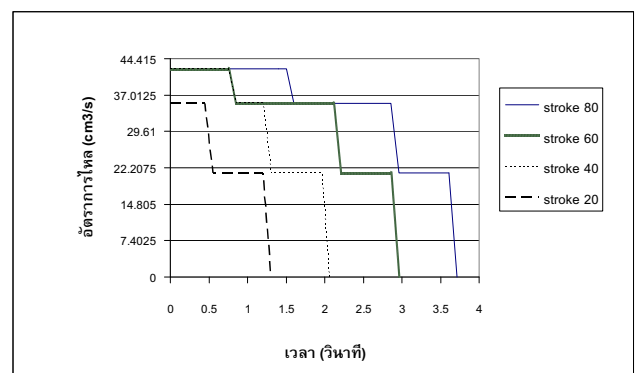
เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีด เวลาที่ใช้ในการฉีด รวมถึงตัวแปรของตำแหน่งช่องทางไหล ช่องทางไหลเข้า จุดที่ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

3. ผลและการวิเคราะห์

ผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองการไหลของขงในแม่พิมพ์นี้และการทดสอบจากแม่พิมพ์ฉีดที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งในการทดสอบในการฉีดจริงโดยการเปลี่ยนแปลงระยะอัตราส่วนในการฉีด ผลในการทดสอบในการเปลี่ยนแปลงดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ที่อัตราการฉีด 80 เปอร์เซ็นต์ นั้นชิ้นงานจะเต็มแม่พิมพ์ดังแสดงในรูป 11 เมื่อปรับอัตราส่วนของการฉีดลงมาต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่ได้จะไม่เต็มแม่พิมพ์ ดังแสดงรูปที่ 12 ซึ่งปริมาณการไหลของเนื้อยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์มีน้อยเกินไป ซึ่งปริมาณการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของเนื้อยางในแต่ละอัตราส่วนของการฉีดได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 เมื่ออัตราส่วนในการฉีดยางน้อยลงจะทำให้ปริมาณการฉีดยางลดลง และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นจะสูงสุดที่อัตราส่วนการฉีดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 80 เปอร์เซ็นต์จะมีความดันสูงที่สุดจะอยู่ที่ 110 บาร์ และจะมีความดันลดลงมาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนในการฉีดลดลง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนในการฉีดขง เวลาในการฉีด และความดันสูงสุด

Stroke (%)	Fill Time (s)	Max Injection Pressure (bar)
80	4.01	1,100
60	2.84	1,050
40	1.88	1,000
20	0.82	800



รูปที่ 10 อัตราการไหลของขงที่อัตราส่วนในการฉีดต่างๆ



รูปที่ 11 ชิ้นงานยางรองที่วางแท่งจักษ์ยานยนต์ที่ได้หลังจากการขึ้นรูปโดยการฉีด

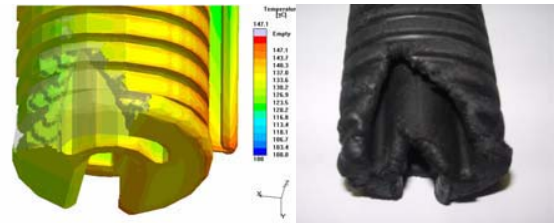
เมื่อได้อัตราส่วนในการฉีดที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ชิ้นงานเต็มแม่พิมพ์คือที่ 80 เปอร์เซ็นต์ จะได้เวลาที่ใช้ในการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ 4.01 วินาที และได้เวลาที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางให้สุกที่ 300 วินาที ความดันสูงสุด 1,100 บาร์ โดยจะควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ทั้งตัวบน และตัวล่างไว้ที่ 160 องศาเซลเซียส



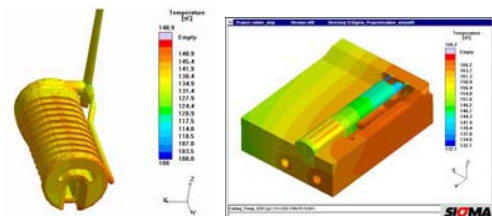
รูปที่ 12 ชิ้นงานที่อัตราส่วนการฉีด 80% 60% 40% และ 20% ตามลำดับ

เมื่อได้ตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากผลการฉีดจริงมาใส่ในโปรแกรมเพื่อทำการจำลองการไหล ผลที่จากโปรแกรม ได้แก่ ทิศทางของการไหลและเวลาที่ไปถึงของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 13 (อัตราส่วนในการฉีดที่ 60 เปอร์เซ็นต์) และการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานยางและแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในเวลาต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการผลที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริง

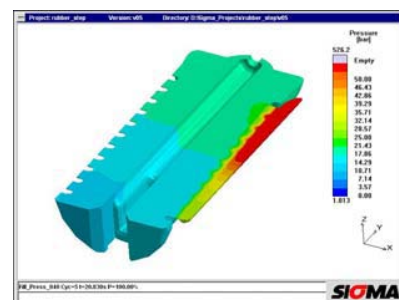
ของแม่พิมพ์ทั้งตัวบน และตัวล่าง ผลของความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ 1,246 บาร์ ซึ่งจากการฉีดจริงนั้นความดันสูงสุดอยู่ที่ 1,100 บาร์ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการในการฉีดที่ 500 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 13 ชิ้นงานจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลองการไหลในโปรแกรม 3D-SIGMA



รูปที่ 14 การกระจายของอุณหภูมิของชิ้นงานยางและแม่พิมพ์



รูปที่ 15 แสดงค่าความดันของเนื้อยางที่จุดกึ่งกลางในตอนสิ้นสุด

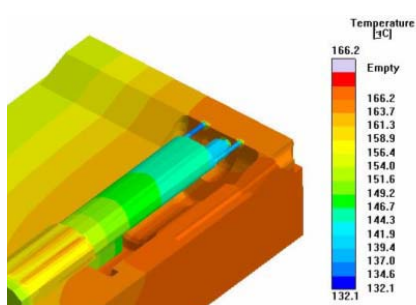
เมื่อทำการผ่าชิ้นงานดูภายในจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้เกิดปัญหาในการติดชุด Insert ภายในนั้นชิ้นงานยังเกิดการสุกตัวไม่เต็มที่ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยยังเหลือลักษณะของยางผสมที่ยังไม่สุกตัวอยู่จึงทำให้เนื้อยางนั้นติดอยู่เมื่อทำการดึงชิ้นงานออกจะทำให้เกิดการติดขึ้นสาเหตุเนื่องมาจากแกนกลางซึ่งเป็นชุดแท่งเหล็กตัวกลวงนั้นไม่ได้มีชุดให้ความร้อนและมีอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งจะต้องอาศัยการให้ความร้อนจากแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่างเข้ามาจนถึงภายใน ซึ่งดูได้จากผลของการจำลองการไหลดังแสดงในรูปที่ 17 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์และให้

เวลาในการบ่มตัวนานขึ้นจะแก้ไขปัญหานี้ของเนื้อยางไม่สุกดังแสดงในรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าเนื้อยางนั้นสุกเท่าเทียมกันหมด ซึ่งจะเป็นลักษณะสำคัญที่ต้องการ



รูปที่ 16 ภายในของชิ้นงานที่เนื้อยางไม่สุกบริเวณที่ติดกับตัว

Insert



ภาพที่ 17 แสดงอุณหภูมิของแท่งเหล็กตัวกลาง (insert) และแม่พิมพ์ตัวล่างขณะทำการบ่มเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ฉีดเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 18 ภายในของชิ้นงานที่เนื้อยางสุกทั่วถึงกัน

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าเมื่อมีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการฉีดให้ลดลงจะทำให้ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์และได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับการฉีด และเมื่อนำตัวแปรต่างๆ ที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมจำลองการไหลโดย การเพิ่มความดันในการฉีดจะทำให้เวลาในการฉีดลดลงแต่จะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะมีผลทำให้การสุกตัวของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์เร็วขึ้นแต่อาจจะมีผลทำให้ผิวของชิ้นงานมีการไหม้เกิดขึ้นได้ และจากการวิเคราะห์การสมดุลของการไหลนั้นช่องทางไหลเข้าเป็นแบบหวี (Fan gate) จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปภายในตัวรูปทรงของชิ้นงานได้สมดุลแต่จะมีข้อเสียที่ความเร็วและความดันในตำแหน่งทางเข้ามีค่าที่สูง นอกจากนั้นเมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองนี้มาเปรียบเทียบกับจริงจากเครื่องฉีดและแม่พิมพ์จริงก็พบว่าผลสอดคล้องกัน จากงานวิจัยจะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wheelans, M. A., 1974. Injection Moulding of Rubber. London Butterworths.
- [2] 3D-SIGMA User's Manual Version 4.4, 2005. SIGMA Engineering GmbH Aachen, Germany.

An Application of Computer Aided Design and Computer Aided Engineering for the Optimized Condition on Rubber Injection Moulding

Seksan Winyangkul^{1*}, Supasit Rodkwan¹, Kittinan Unnanon², Chana Raksiri³ and Kunayut Eiamsa-ard¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University and

Center of Excellence in Rubber Mould, Research and Development Institute of Industrial Production Technology

²National Metal and Material Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency

(NSTDA), Ministry of Science and Technology, Klongluang, Pathumthani 10210, Thailand,

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Jatujak, Bangkok 10900, Thailand. Tel: 0-2942-7188, Fax 0-2942-7189, *E-mail: seksanwin@yahoo.com

Abstract

Rubber moulds used in the injection moulding process in Thai rubber product industry are usually manufactured by the mould makers who often use skilled and experienced workers with trial-and-error method including conventional tools/ machines in mould design and manufacturing processes. As a result, various defects of the rubber products such as excessive flashes and air traps are occurred. This leads to several mould try-outs and losses of raw material used in the process. Therefore, this research aims to apply Computer Aided Design/ Engineering (CAD/CAE) techniques for optimized injection conditions. The significant input variables including material properties of the natural rubber (NR40) like heat conductivity, viscosity and shear rate, curing time and operating conditions like mould temperature, injection pressure, injection time including the gating and runner positions. The numerical results are also correlated well with the empirical data using the rubber injection machine. This research provides rubber researchers the tools to seek for the best operating conditions in injection moulding.

Keywords: Computer Aided Design/ Engineering (CAD/CAE), Rubber Injection Moulding.

1.Introduction

Generally, the rubber mould making for products formed by injection, Interprener usually use the outsource company in order to make the mould. Which usually use their skills and trial and error including the tolls and machine needed the human control rather than computer programming. As consequently, the problem in quality of the

product occurs, for example over needed materials which attach to the product and air trop.

This leads to modify the mould which cost, loss of valuable time and opportunity in shoring market are concern able.

This research aims to study and be the alternative way of solution according to problem described above by computer Aided Design/Engineering (CAD/CAE) technique for optimized injection conditions.

2.1 Material and Mythology

In this research, foot step for motorcycle is selected to be case study by using NR 40 rubber. The example of work piece and cad model is shown in figure 1.



Figure 1: Rubber Step for Motorcycle

The machine type of rubber injection is NISSEI, model TH100-25VSER, capacity 100 ton, and the volume of cylinder is 254 cm³. This machine is a treasure of Research and Development of Industrial Promotion Technology (RDiPT), Faculty of Engineering, Kasetsart University as shown in figure 2.



Figure 2: Vertical-Rubber-Injection Machine

After designing and drawing the work-piece model in Figure 1, rubber mould used in vertical-rubber-injection Machine is designed respectively as shown in Figure 3. There are 4 important components in mould and insert set locating on both sides of the mould. This insert set slides into mould's side by using a guide rail when mould is closed. The insert set is opened whenever the mould is lifting. Guide pin is used to direct upper mould and lower mould in order to make both moulds closely. Two heaters (10 mm. diameter) are embedded on the upper mould as well as on the lower mould. Hot rubber flows into gate which is comb gate, hence liquid rubber flows on the side of the mould. 3D-Sigma is used to simulate and correct mould after finishing the drawing in CAD system. The result of the calculation is used to fabricate the moulds show in Figure 4 and Figure 5.

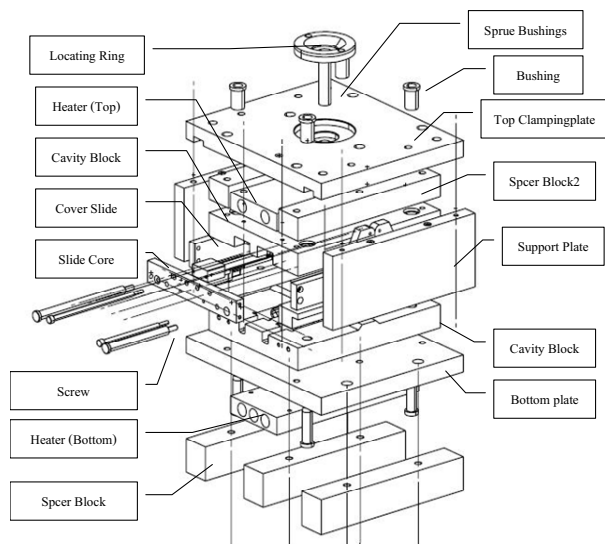


Figure 3: Mould Design

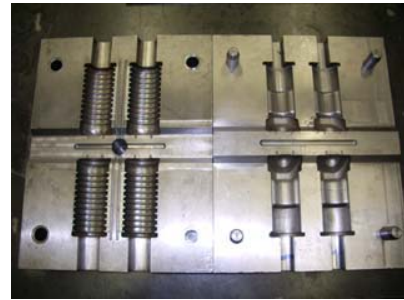


Figure 4: Upper and Lower Mould

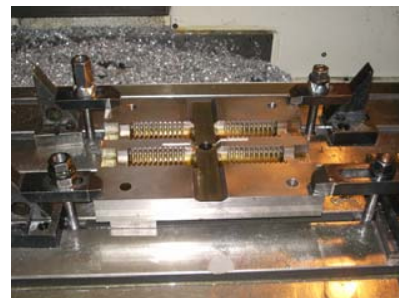


Figure 5: Completed Mould

2.2 3D-SIGMA Analysis

Firstly, The data is inputted into the program. The CAD model in the database, STL File, is opened. The main components of the mould as shown in Figure 6 composing of cavity plate core plate, heater rod, inlet and tracer are defined in 3D-SIGMA program.

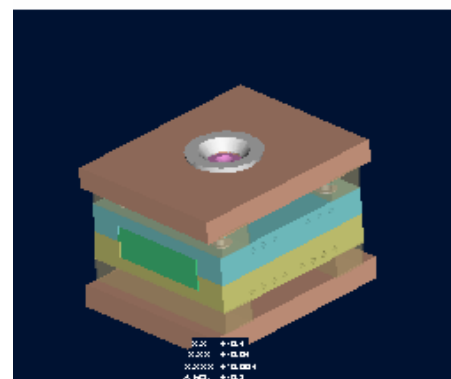


Figure 6 Main components of mould

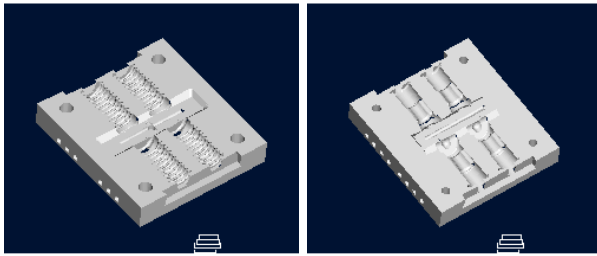


Figure 7: Shape of Mould from Drawing

After inputting all necessary data, processor divides work piece into very small cube, such method is called “enmeshment”. There are 4 types, which the program can handle, for example a) Automatic b) Standard c) Advanced and d) Advanced 2. In this research, the researchers choose Advance 2 for element dividing. Because it can be defined more details for each parts, the results are improved for higher accuracy. For example, we can define the size of the gate, which is very small-only 0.5 mm. So this element must smaller than the other parts.

The next step is to define material and necessary parameters of injection process. The raw material chosen to the experiment is natural rubber, NR-40. There is no data in the program for such raw material, the researcher make the experiment in order to find the parameters for the program. The important data are the initial temperature for injection, and the data which are necessary for making internal database such as

- Heat Conductivity,(Lambda)
- Density,(Rho)
- Heat Capacity,(Cp)
- Viscosity as a function of Shear Rate*

*The minimum numbers for temperature interval should be 3, and at any temperature’s interval the experiment should not less than 15.

Before simulation process, the data of the process should be initiated such as temperature of both work piece and mould. The next step is to define temperature-convection parameter of work piece and mould or fixed mould and movable mould. (Part/Mould-350 (W/m2K), Mould/Mould-10,000 (W/m2K))

The defining time interval can be divided into 5 intervals for one cycle is as follow Figure 8.

- Lead Time
- Filling Time
- Movable Part

- Fix Part
- Part take out



Figure 8: Time Interval for Simulation Process

Then, the simulation of rubber injection can be run in 3D-SIGMA by using parameters of rubber-injection machine such as temperature of mould, pressure of mould, time for injection including parameters of gate, positions of heater.

Parameter and Control

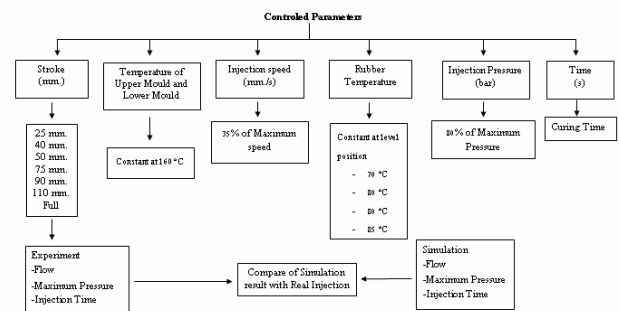


Figure 9 Control Parameters

Temperature of mould is fixed at 160 °C because is a manufacturing’s control parameter making the cured rubber within the specific time.

Generally, The condition of the rubber in room temperature is liquid and it changes to solid after heating. Hence the control temperature is vital process as follows. Step 1) the initial heating temperature for NR40 is set at 70 °C. Step 2 and 3) the temperature at the nozzle is set at 85 °C. The temperature of rubber where ejects from the nozzle is higher than 15-20 °C. Therefore, The temperature for ejection is 100 °C.

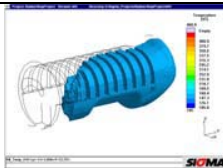
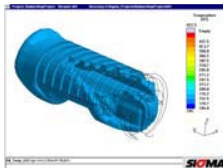
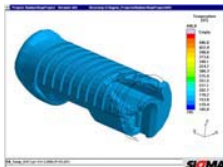
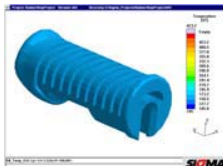
Pressure of ejection process is limited to 80 to 90 percent of maximum pressure of the machine.

3. Analysis and Result

From the 3D-SIGMA simulations, the result from simulation is compared to the real experiment. The researcher used 4-cavity mould in pilot study but the volume of cylinder of the machine at RDIPt is not enough for 4-cavity ejection. Therefore, the numbers of cavities in this work is them reduced to 2 cavities and the parameters of simulation program are changed to 2-cavity mould also. The results using parameter from the Figure 9 are shown in Table 1 comparing of simulation result with real injection. The stroke of injection machine is varied in the experiment for data collection of flow, pressure and injection time. However, the result from simulation and real injection is close. The differences in pressure parameters of the program input and experiment caused the differences in results. This problem is caused element segmentation of workpiece at the ingate, which is 3 layers, provides more pressure than real injection. Theoretically, the more layer segmentation, the more time consuming calculation time. The problem causes from data-collection error to rubber characteristics, hence viscosity in the simulation is higher than real injection

Table 1 Comparing of Simulation Result and Real Injection

Stroke	Simulation	Real Injection
25 mm	 injection pressure 1298 bar injection time 1.028 second	 injection pressure 777 bar injection time 1.02 second
40 mm	 injection pressure 1300 bar injection time 1.500 second	 injection pressure 858 bar injection time 1.49 second

Stroke	Simulation	Real Injection
50 mm	 injection pressure 1300 bar injection time 1.800 second	 injection pressure 840 bar injection time 1.83 second
75 mm	 injection pressure 1307 bar injection time 2.701 second	 injection pressure 865 bar injection time 2.69 second
90 mm	 injection pressure 1315 bar injection time 3.200 second	 injection pressure 918 bar injection time 3.18 second
120 mm	 injection pressure 1326 bar injection time 3.426 second	 injection pressure 911 bar injection time 4.19 second

3.1 Simulation Results from 3D-SIGMA

1) Air Contact Time

From Figure 10, the maximum time of rubber attach with the air is 0.0896 sec. Hence, there is a chance to make air bubble in/on the workpiece.

2) Filled Time

From Figure 11, filled time of ejection rubber is not homogeneous within whole moulds because the difference of cured rubber varies from place to place. Rubber coming in to mould first, should be cured first.

3) Flow length

As show in Figure 12, If the workpiece is long or complicate, rubber should not full in mould.

4) Material Age

As show in Figure 13, material age or rubber age provide premature action. If the mould is big size or has many cavities, rubber age is significant for quality of workpiece.

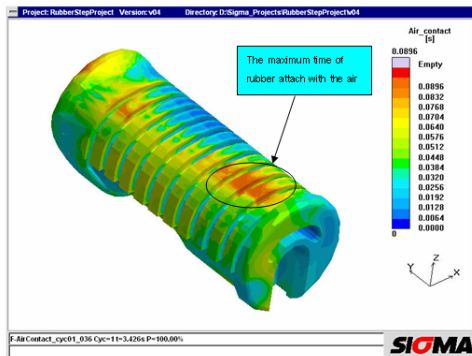


Figure 10: The Maximum Time of Rubber Attach with the air

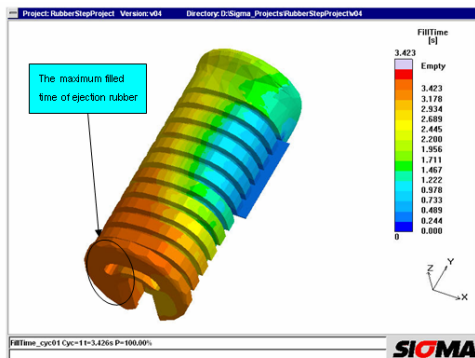


Figure 11: Filled Time of Ejection Rubber

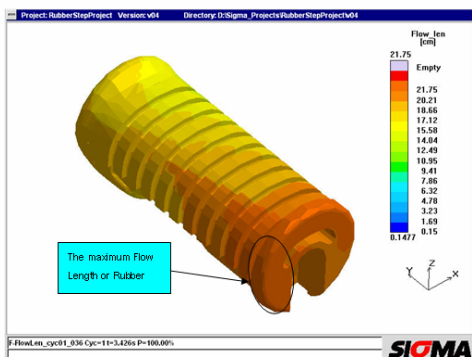


Figure 12: Flow Length or Rubber

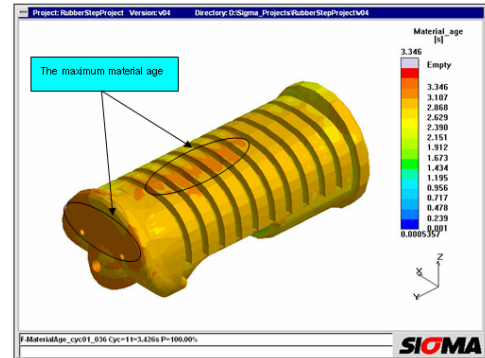


Figure 13: Rubber Age

5) Wall Contact Time

Figure 14 shows wall contact time. Wall contact means the gap between rubber and mould. If the wall contact time is longer, the rubber at that contact provides premature rubber.

6) Weldline

Figure 15 shows weldline of rubber. It may cause problem such as air bubble. Mostly, air bubble is inside the rubber, but in this experiment it appears at the surface of workpiece.

7) Tracers of Rubber Particle

Rubber flow can be seen from Figure 16; showing direction of rubber particle. Obviously, rubber particle flow from the sprue to the cavity at the ingate then flow to the upper end of mould and lower end of mould, respectively. Hence, the rubber is filled up at the upper end before filled up at the lower end of mould.

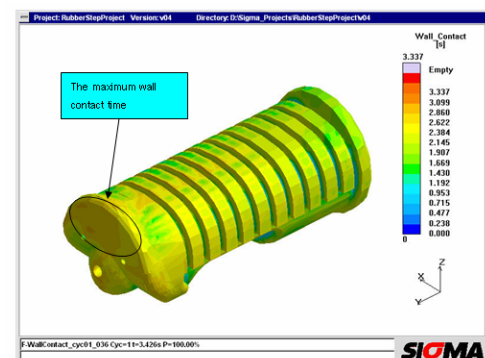


Figure 14: Wall Contact Time

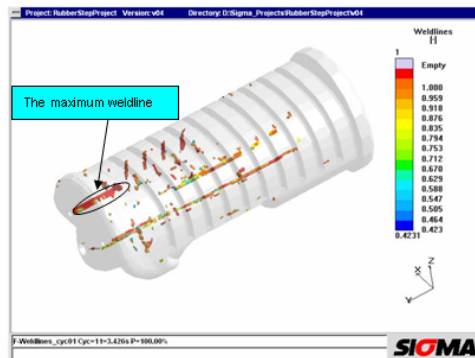


Figure 15: Weldline of Rubber

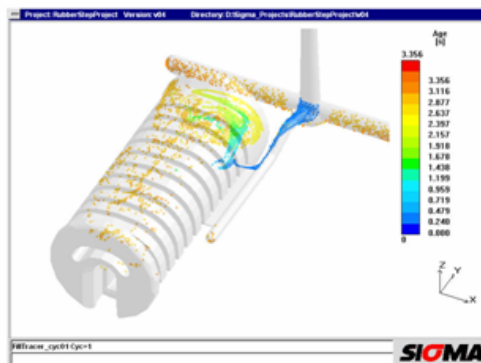


Figure 16: Tracers of Rubber Particle

8) Injection Temperature

Temperature of rubber in the process shown in Figure 17. Temperature at 25% of injection is around 130-140 °C and Temperature at 50%, 75%, and 100% of injection is around 140-150 °C. The maximum temperature is located at the surface of workpiece. Rubber temperature effects the process and the quality of product. Theoretically, using high temperature reduces cycle time and cost. However, the disadvantage of using high temperature is premature before rubber full in the cavity which over cure in rubber, For this reason, temperature should be adjust suitably with rubber formula before start production. Simulation can help user to adjust optimum parameters of rubber injection by reducing the experimental and material.

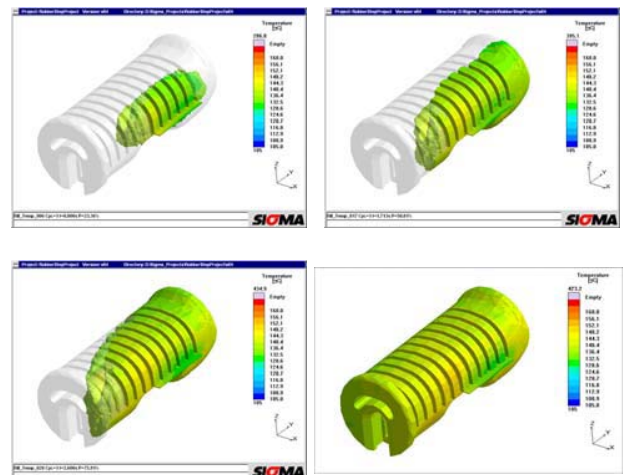


Figure 17: Injection Temperature at 25%, 50%, 75% and 100%

4. Conclusions

According to the research, it is found that injection rate is descended the product is not fully filled. The optimum condition for injection, after considering all controlled parameter, the pressure is very high at the beginning of the process and keep the constant pressure until the cavities are fulfilled. For gate is suitable to use in the product, however, the disadvantage of high velocity at for gate inlet. More over, the comparison of practical condition and simulation by 3D-SIGMA, the result is compatible, this leads the application of CAE with 3D-SIGMA to design and analyses the optimum condition for injection moulding in nearly future.

Acknowledgement

- Thai-German Institute (TGI) for supporting “Application of Reverse Engineering for Improved Rubber Mould Design and Inspection System” project in 2005 .
- The Thailand Research Fund (TRF) for supporting “Application of Reverse Engineering for Improved Rubber Mould Design and Inspection System” project in 2005 .
- Rungham Panyawipart, Suchada Rianmora and Watcarapong Chookeaw from Center of Excellence in Rubber Mould (CERM), Research and Development Institute of Production Technology, Faculty of Engineering, Kasetsart Universit

References

- [1] Wheelans, M. A., 1974. Injection Moulding of Rubber. London Butterworths.
- [2] 3D-SIGMA User's Manual Version 4.4, 2005. SIGMA Engineering GmbH Aachen, Germany.

เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้อมูลวิชาการยางพารา 2545: กรมวิชาการเกษตร, กรกฎาคม 2545.
- [2] ยุทธศาสตร์การพัฒนายางพาราครบวงจร (2542-2546): คณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติ, 2545.
- [3] วราภรณ์ ขจรไชยกูล, กระบวนการผลิตยาง: กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร, พฤศจิกายน 2530.
- [4] R. P. Brown, "Rubber Product Failure," Rapra Review Reports, vol. 13, 2002.
- [5] J. A. Lindsay, "Rubber Injection Moulding : A Practical Guide," Rapra Review Reports, Report 109, vol. 10, 1999.
- [6] E. Bociaga, "Effect of Mould Temperature and Injection Speed on Selected Properties of Polyethylene Mouldings," International Polymer Science and Technology, vol. 28, pp. 98-102, 2001.
- [7] E. Bociaga, "Influence of the Method of Feeding the Polymer into the Injection Mould Cavity on the Structure and Crystallinity of High Density Polyethylene," International Polymer Science and Technology, vol. 29, pp. 99-102, 2002.
- [8] D. E. Packham, "Moulding Sticking, Fouling and Cleaning," Rapra Review Reports, vol. 13, 2002.
- [9] M. J. Forrest, "Rubber Analysis - Polymers, Compounds and Products," Rapra Review Reports, vol. 12, 2001.
- [10] V. Goodship and J. C. Love, "Multi-material Injection Moulding," Rapra Review Reports, vol. 13, 2002.
- [11] S. L. Kushnarenko, T. R. Voskresenskii, and V. N. Krasovskii, "Modelling of the Moulding Vulcanisation of Standard Rubber Footwear," International Polymer Science and Technology, vol. 28, pp. 48-49, 2001.

- [12] E. Haberstroh and I. Kleba, "Simulation of Warpage Behaviour of Pur Sandwich Structures," International Polymer Science and Technology, vol. 28, pp. 1-5, 2001.
- [13] I. A. Barvinskii and I. E. Barvinskaya, "Influence of the Site of the Runner on the Warpage of an Injection Moulded Article Made from Glass Fibre Filling Material," International Polymer Science and Technology, vol. 29, pp. 63-65, 2002.
- [14] M. G. Novitskii and P. G. Babaevskii, "Modeling and Calculation of the Orientation of Short Fibers During the Flow of Dilute Polymer Composites in a Narrow Channel," International Polymer Science and Technology, vol. 29, pp. 33-37, 2002.
- [15] F. Mark, "True 3D Makes all the Difference," EurekaMagazine, 2002.
- [16] K. H. Lothar and H. Georg, "Simulation of the Injection Moulding of EPDM", Injection Moulding Asia, 2002, pp. 14-15.
- [17] K. Lothar and T. Mazmur, "Simulating the Product Process," Injection Moulding Asia, pp. 1-2, June, 2003.
- [18] K. Lothar, "Optimization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts with 3D Simulation," Sigma Engineering GmbH, Aachen, 2001.
- [19] นริศรา รอดเดชม, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายพันธุ์ข้ามกับสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง: วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2546
- [20] รัชดา โสภาคะยัง, การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ระหว่างวันที่ 15-17 ตุลาคม 2546

- [21] อรรถพล สุชีวุฒิ, การประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก:วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2545
- [22] วราภรณ์ ไชยกุล, การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต: ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2542.
- [23] Sommer, John G., "Elastomer Molding Technology" Elastech Hudson, Ohio, 2003
- [24] Hawthorne Rubber Mfg. Corp. (2004), "Information about Compression, Transfer, and Injection Moulding", Available Source: <http://www.hawthornerubber.com/index.html>, November 30, 2005.
- [25] Straton Industries, "Rubber Mold Design & Construction", Available Source: <http://www.straton.com/rubber.htm>, November 30, 2005.
- [26] M. A. Wheelans, Injection Moulding of Rubber: London Butterworths, 1974.
- [27] Ciesielski, A. (1999), "An Introduction to Rubber Technology", Rapra Technology Limited, United Kingdom.
- [28] P. S. Johnson, Rubber Processing : Hanser Gardner, August 2001.
- [29] Nissei America, Inc. (2005) "Rubber Injection Molding Machine", Available Source: <http://www.nisseiamerica.com/>, November 30, 2005.
- [30] C. M. Blow and C. Hepburn, Rubber Technology and Manufacture, Second Ed: Plastic and Rubber Institute Butterworth Scientific, 1982.
- [31] Indian Rubber Institute, "Rubber Engineerin", McGraw-Hill, 2000.
- [32] 3D-SIGMA User's Manual Version4.4: SIGMA Engineering GmbH Aachen Germany, 2005.