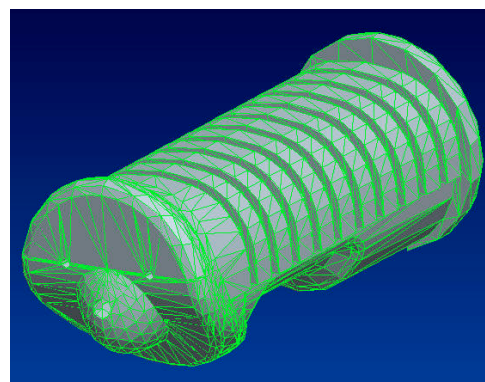
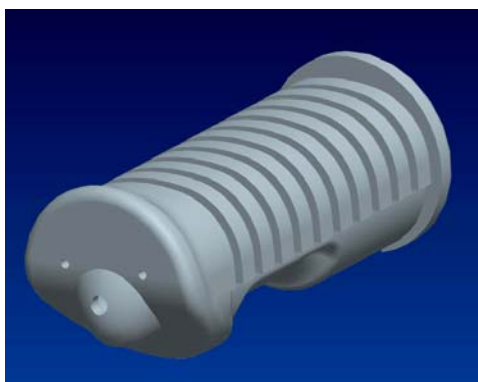


ผลและวิจารณ์

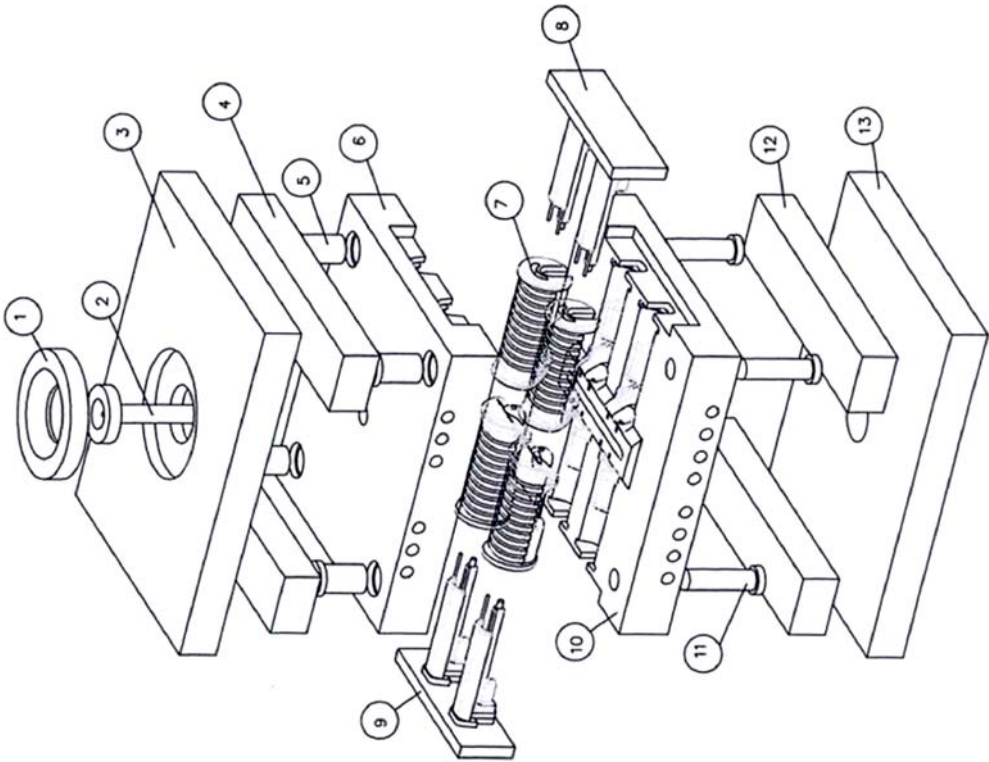
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์การฉีดของยางเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดโดยใช้ผลิตภัณฑ์ยางรองเท้าจักรยานยนต์ ในการทดสอบ โดยการใช้โปรแกรม 3D-SIGMA ที่ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ไว้ในโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบ (CAD) ซึ่งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค วิเคราะห์ควบคู่ไปกับการทดสอบการฉีดจากแม่พิมพ์ที่ทำการผลิตขึ้น โดยในการทดสอบจะทำการควบคุมตัวแปรในการฉีดให้เหมือนกัน ซึ่งได้แก่ ความดันที่ใช้ในการฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ เวลาที่ใช้ในการฉีด รวมไปถึงเนื้อยางที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ

ผลการใช้โปรแกรม 3D SIGMA

เมื่อทำการเขียนรูปชิ้นงานเสร็จจึงแสดงในภาพที่ 89 จากนั้นทำการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดในการทดสอบกับเครื่องฉีดยางดังแสดงในภาพที่ 90 ซึ่งจะมีจำนวนของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์อยู่ 4 ชิ้นงาน โดยมีชุดอินเสิร์ต (insert) อยู่ทั้งสองด้านของแม่พิมพ์และจะทำการเลื่อนเข้าเมื่อแม่พิมพ์ได้ทำการปิดตัวลงโดยอาศัยแผ่นนำร่องในการเข้าประกบ และจะเปิดตัวออกเมื่อแม่พิมพ์ได้ทำการยกตัวขึ้น และใช้พินในการนำลงในการประกบกันของแม่พิมพ์ด้านบนและด้านล่าง ส่วนการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์นั้น ได้ใช้แท่งให้ความร้อนจำนวน 4 แท่งแบ่งด้านบนและด้านล่างอย่างละสองแท่งซึ่งแท่งให้ความร้อนมีขนาด 10 มม. ส่วนช่องทางไหนเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นจะเป็นช่องทางไหล (gate) เข้าแบบหวี ซึ่งจะทำให้เนื้อยางไหลเข้าบริเวณด้านข้างของแม่พิมพ์



ภาพที่ 89 ยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเขียนขึ้น



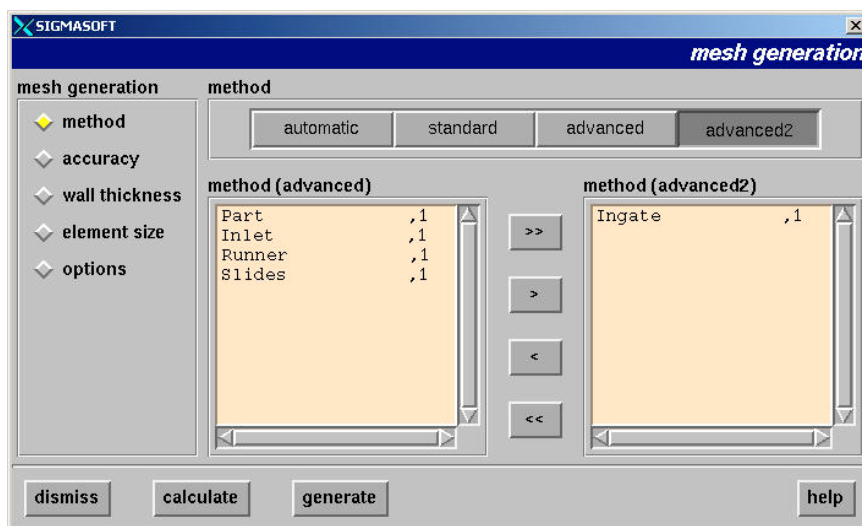
ลำดับที่	ชื่อส่วน	จำนวน
1	Locating Ring	1
2	Spure Bush	1
3	Plate Cavity	1
4	Spacer Block	2
5	Guide Bush	4
6	Cavity Plate	1
7	Part Model	4
8	Slide Core (R)	1
9	Slide Core (L)	1
10	Core Plate	1
11	Guide Pin	4
12	Spacer Block 2	2
13	Plate Core	1

ภาพที่ 90 แม่พิมพ์ฉีดที่ทำการออกแบบ

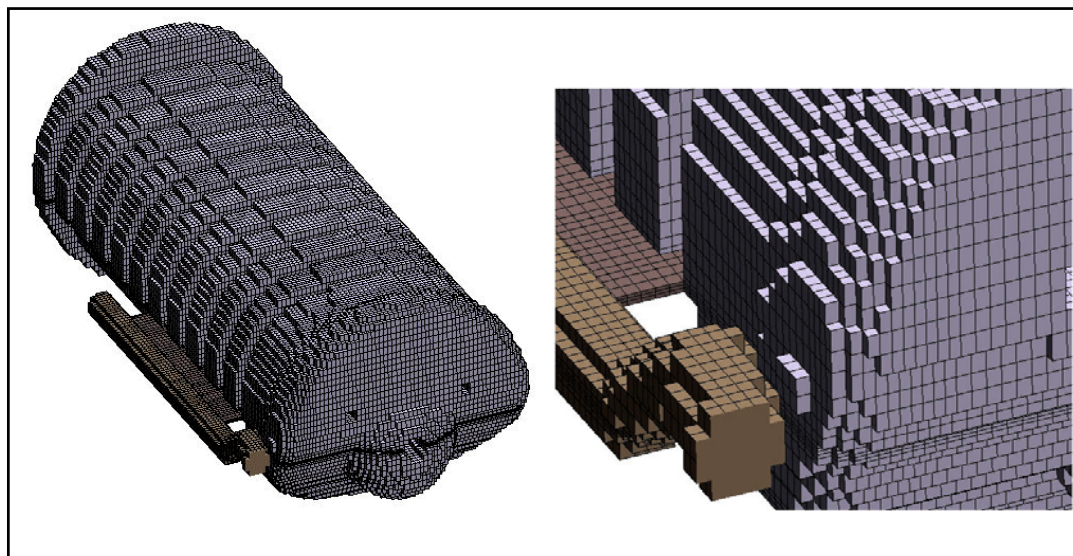
การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นตอนแรก คือ Preprocessor เป็นการเปิดไฟล์แบบชิ้นงานที่ได้จัดเก็บไว้ในรูปแบบ STL File ทำการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์เพิ่มเติม ได้แก่ แผ่นแม่พิมพ์บน (cavity plate) แผ่นแม่พิมพ์ล่าง (core plate) แท่งความร้อน (heater rod) ช่องฉีด (inlet) และอนุภาคยาง (tracer) จากนั้นทำการกำหนดส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ให้โปรแกรมรับรู้

หลังจากเสร็จสิ้น Preprocessor ก็จะทำการแบ่งเอลิเมนต์ (elements) คือการแบ่งชิ้นงาน และแม่พิมพ์ออกเป็นลักษณะทรงลูกบาศก์เล็กๆ ขั้นตอนนี้เรียกว่า Enmeshment ซึ่งตัวโปรแกรม จะมีการแบ่งได้ 4 แบบ คือ 1) Automatic 2) Standard 3) Advanced และ 4) Advanced 2 ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกการแบ่งเอลิเมนต์แบบ Advanced 2 เพราะสามารถเลือกแบ่งระดับ ความละเอียดให้แต่ละส่วนได้ทำให้ค่าการวิเคราะห์ที่ได้แม่นยำมากขึ้น เช่น ในส่วนของรูเข้า ซึ่งมีขนาดเพียง 0.5 มม. ขนาดของเอลิเมนต์จึงต้องเล็กกว่าส่วนอื่น ๆ เป็นต้น ภาพที่ 91 และ 92 แสดงการกำหนดขนาดของและลักษณะเอลิเมนต์

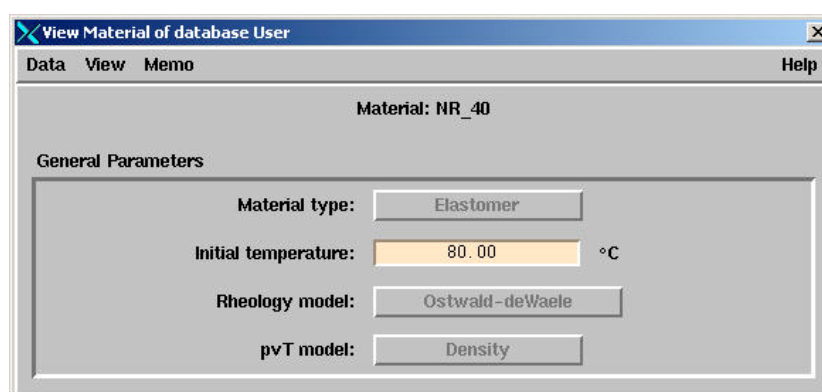


ภาพที่ 91 แสดงการกำหนดเอลิเมนต์

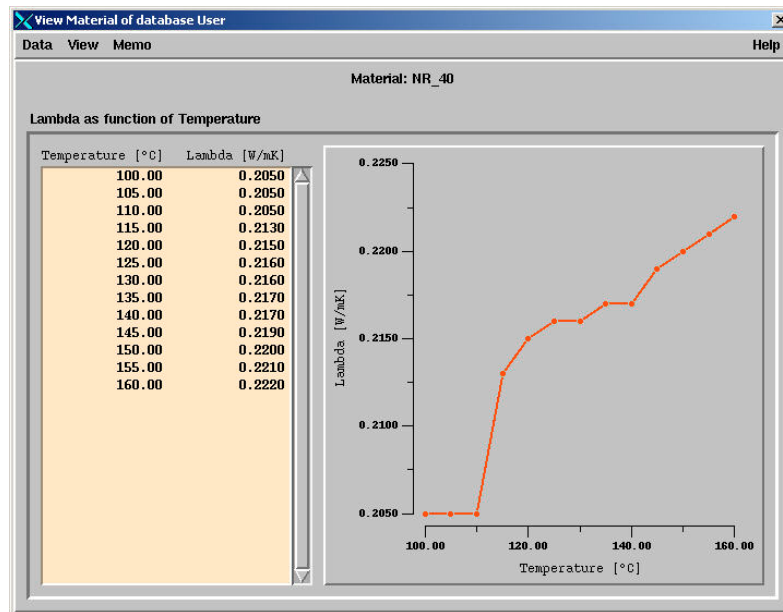


ภาพที่ 92 แสดงลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงาน

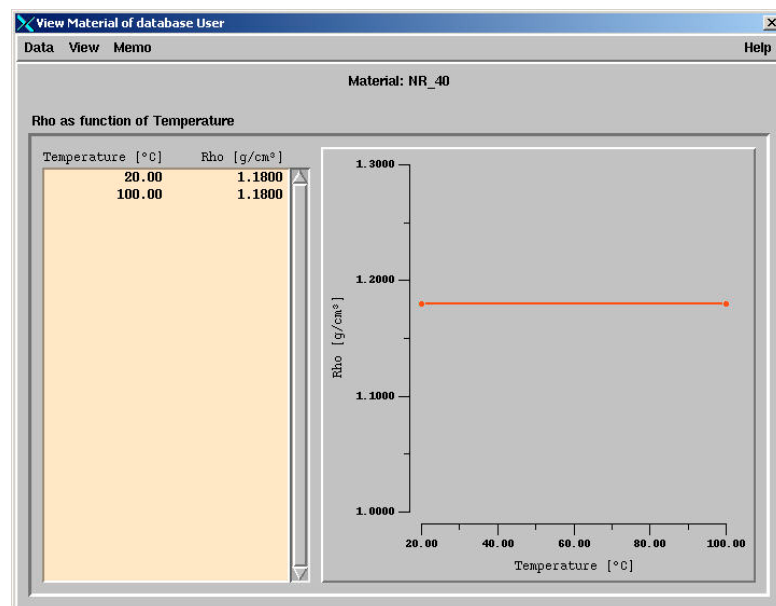
ขั้นตอนต่อมาเป็นการกำหนดวัสดุ และค่าต่าง ๆ ของกระบวนการฉีด วัสดุที่เลือกใช้กับชิ้นงานเป็นวัสดุที่ใช้กับผลิตภัณฑ์จริง คือ ยางธรรมชาติ (NR40) ซึ่งไม่มีในฐานข้อมูลของโปรแกรมจึงต้องนำยางไปทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติบางประการที่จำเป็นในการวิเคราะห์ของโปรแกรม ซึ่งค่าที่จำเป็นได้แก่ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (initial temperature) ค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ค่าของ Density (Rho) ค่าของ Heat Capacity (Cp) ค่าของ Dynamic Viscosity ที่ 3 อุณหภูมิ ค่าของ Curing Rate ที่ 3 อุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 93 ถึง 98



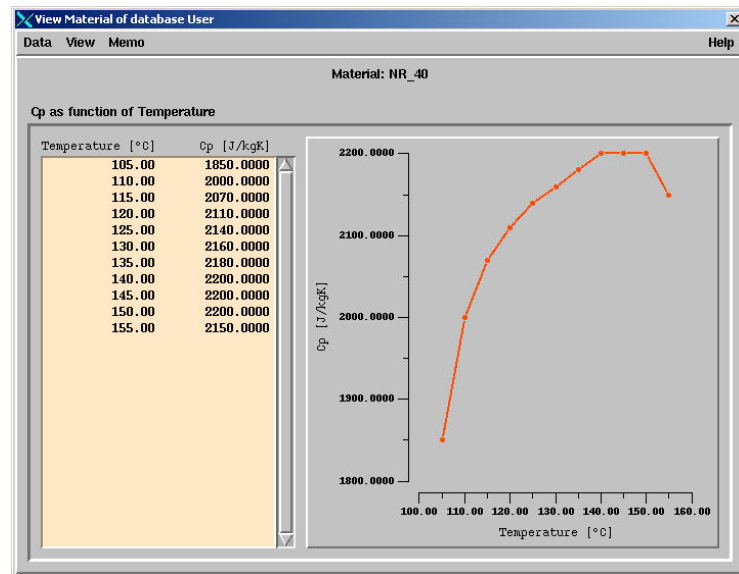
ภาพที่ 93 แสดงการกำหนดค่าทั่วไปของยาง



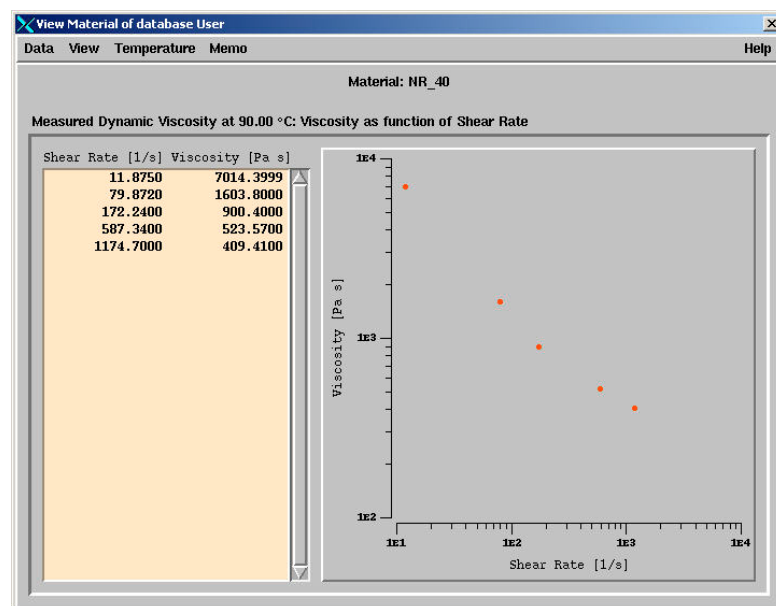
ภาพที่ 94 แสดงการกำหนดค่า Heat Conductivity (Lambda)



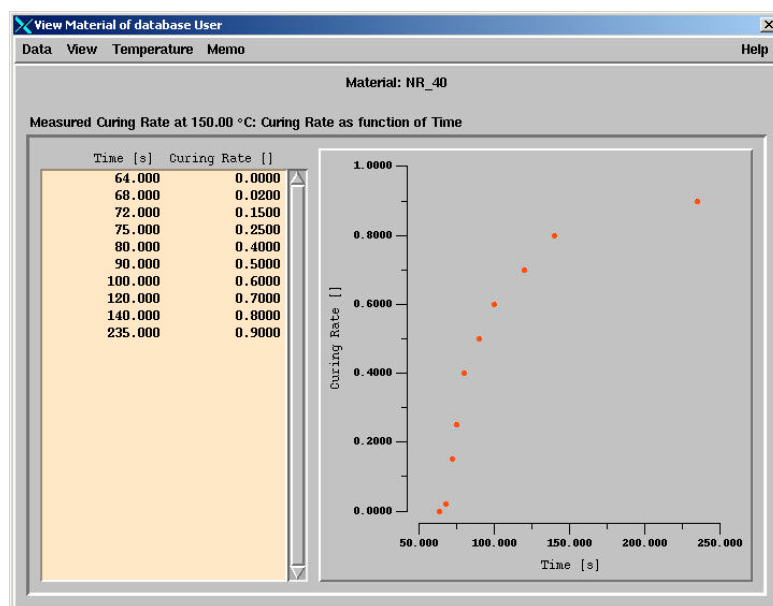
ภาพที่ 95 แสดงการกำหนดค่า Density (Rho)



ภาพที่ 96 แสดงการกำหนดค่า Heat Capacity (Cp)



ภาพที่ 97 แสดงการกำหนดค่า Dynamic Viscosity



ภาพที่ 98 แสดงการกำหนดค่า Curing Rate

ในการกำหนดวัตถุดิบของกระบวนการนั้นยังรวมไปถึงการกำหนดวัตถุดิบของวัสดุแม่พิมพ์ด้วยซึ่งในการวิเคราะห์นี้ได้ใช้เหล็ก X45NiCrMo4 ซึ่งเป็นเหล็กสำหรับงานแม่พิมพ์ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมอยู่แล้ว จากนั้นต้องทำการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของส่วนต่าง ๆ อีกด้วยดังนี้

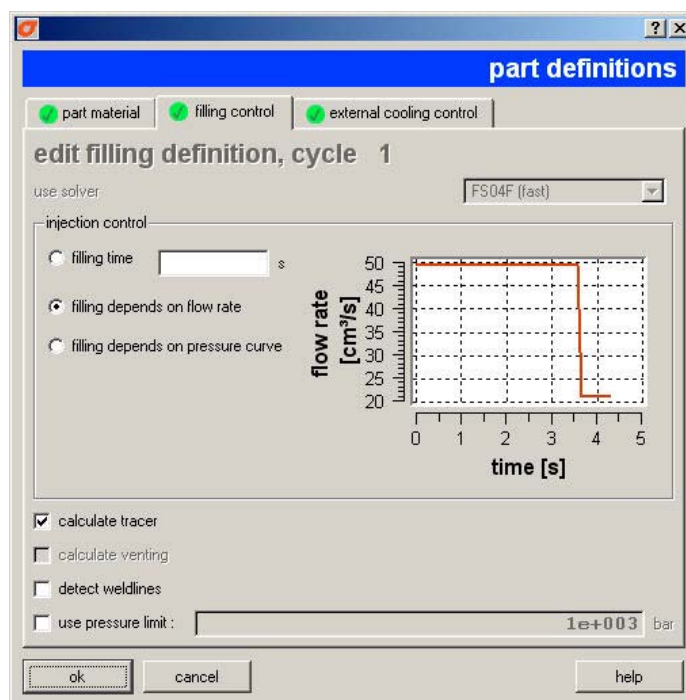
1. ขาง อุณหภูมิเริ่มต้น 100 °C
2. แม่พิมพ์ อุณหภูมิเริ่มต้น 160 °C
3. ทำความความร้อน อุณหภูมิเริ่มต้น 160 °C

เนื่องจากโปรแกรมสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ด้านผลกระทบของอุณหภูมิของขางและแม่พิมพ์ได้ จึงต้องมีการกำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วนประกอบด้วย ดังภาพที่ 99 ซึ่งค่าที่ใช้นั้นอ้างอิงจากคู่มือการอบรมโปรแกรม 3D-SIGMA

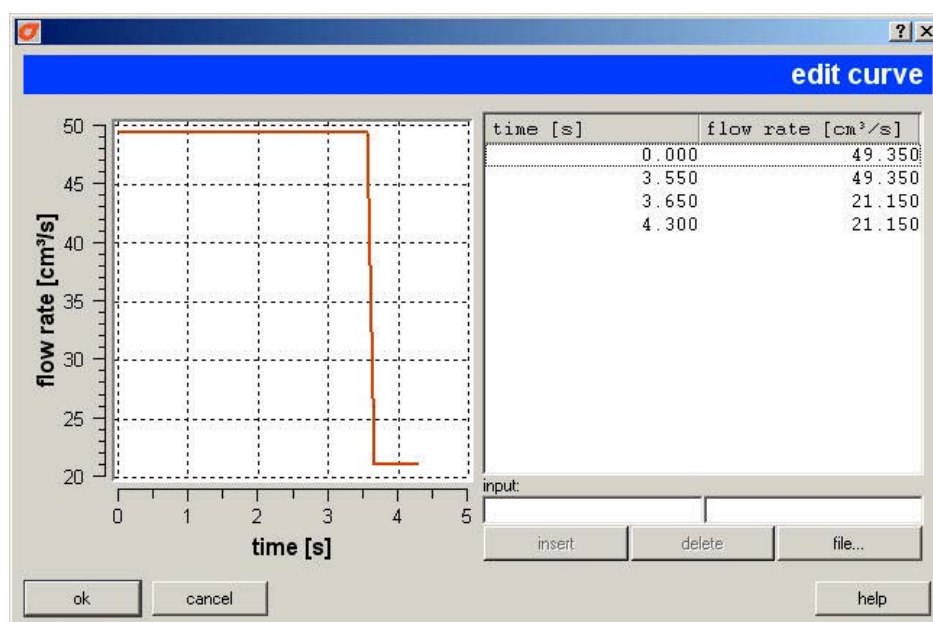
heat transfer definitions					
material 1	ID label 1	material 2	ID label 2	HTC database/filename	HTC dataset group
Part class		Mould class		SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Slides	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 2	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Ingate	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Ingate	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Mould class		Mould class			Constant
Slides	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Slides	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Movable	ID 1	Movable Half	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 2	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Fixed Half	ID 1	Fixed Half	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Mould class		Tempering class		SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 2	Tempering	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Fixed Half	ID 2	Tempering	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant

ภาพที่ 99 แสดงการกำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วน

ต่อจากนั้นทำการกำหนดค่าการฉีด ซึ่งโปรแกรมนั้นสามารถเลือกได้ 3 วิธี คือ 1. ควบคุมการฉีดด้วยเวลา (filling time) 2. ควบคุมการฉีดด้วยอัตราการฉีด (filling depend on flow rate) และ 3. ควบคุมการฉีดด้วยความดัน (filling depend on pressure curve) ในการวิจัยนี้ได้เลือกค่าการฉีดแบบควบคุมด้วยอัตราการฉีด เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากเครื่องฉีดจริงที่ทำการควบคุมการฉีดด้วยความเร็วฉีด (ความดันฉีดคงที่) ลักษณะการกำหนดค่าการฉีดดังแสดงในภาพที่ 100 และ 101

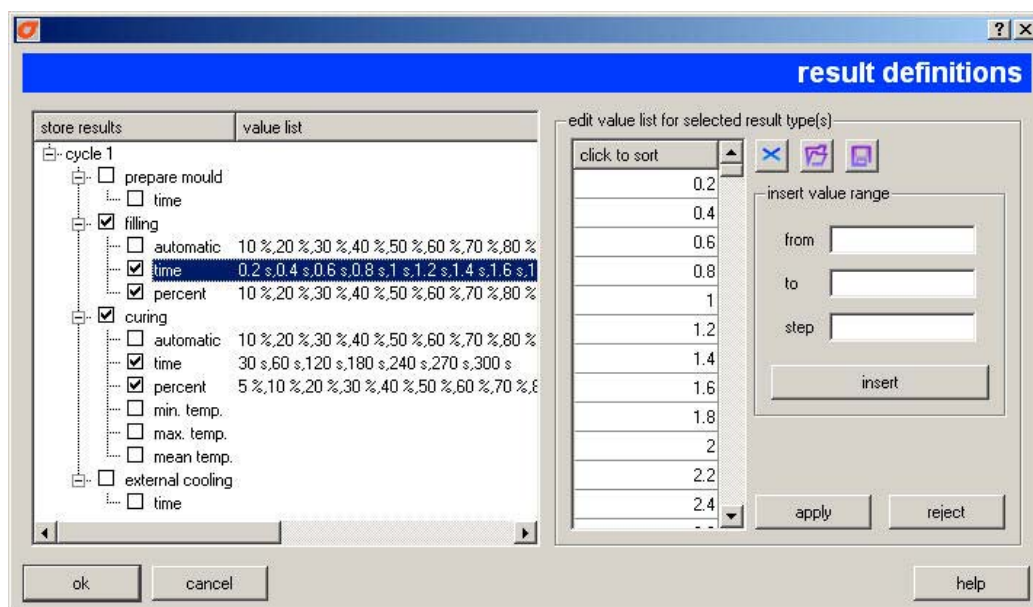


ภาพที่ 100 แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าการฉีด



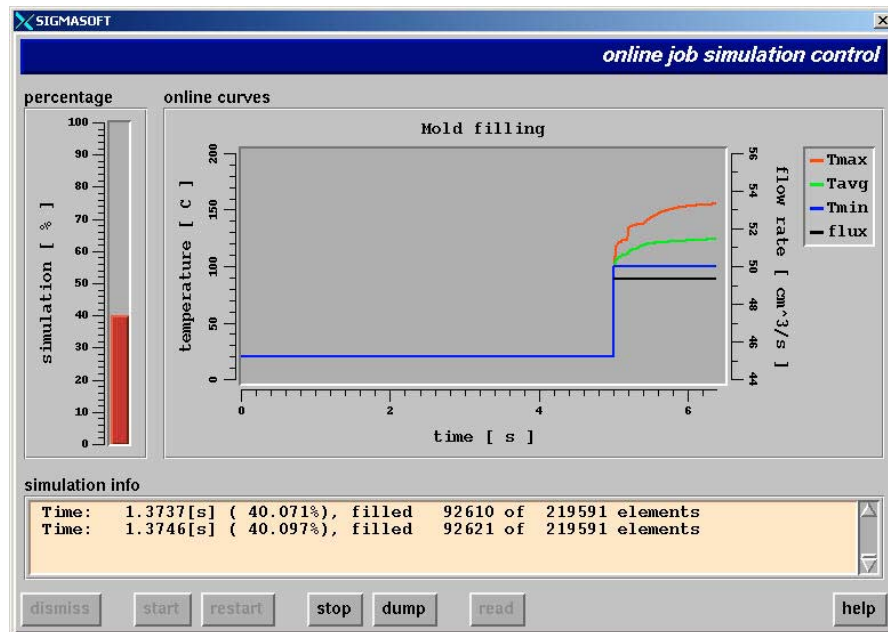
ภาพที่ 101 แสดงการกำหนดค่าการฉีดที่ควบคุมด้วยอัตราฉีด

ขั้นตอนสุดท้ายในการกำหนดค่าของกระบวนการฉีดนั้นคือการกำหนดค่าการเก็บผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งการเก็บผลนั้นสามารถให้โปรแกรมเก็บโดยขึ้นกับเวลา หรือเปอร์เซ็นต์ หรือทั้งเวลาและเปอร์เซ็นต์ก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 102



ภาพที่ 102 แสดงการกำหนดค่าการเก็บผลการวิเคราะห์

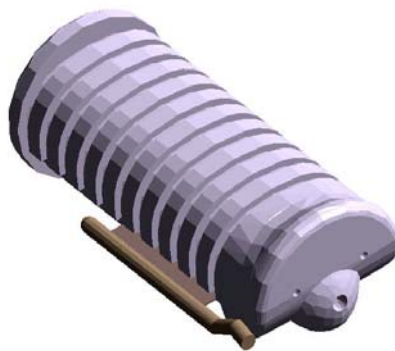
เมื่อเสร็จการกำหนดค่ากระบวนการฉีดแล้วก็สามารถเริ่มการวิเคราะห์ได้ ซึ่งขณะทำการวิเคราะห์โปรแกรมจะมีหน้าต่างแสดงสถานะขึ้นตลอดเวลา ดังแสดงในภาพที่ 103



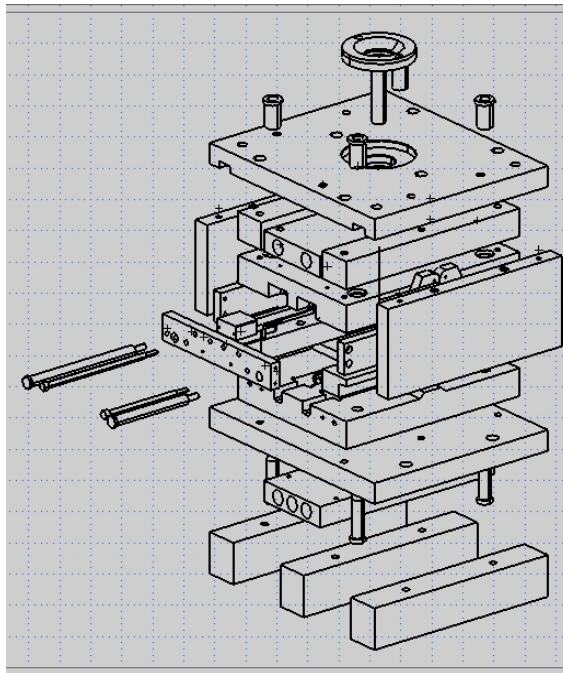
ภาพที่ 103 หน้าต่างแสดงสถานะขณะทำการวิเคราะห์

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปที่วางเท้ารถจักรยานยนต์

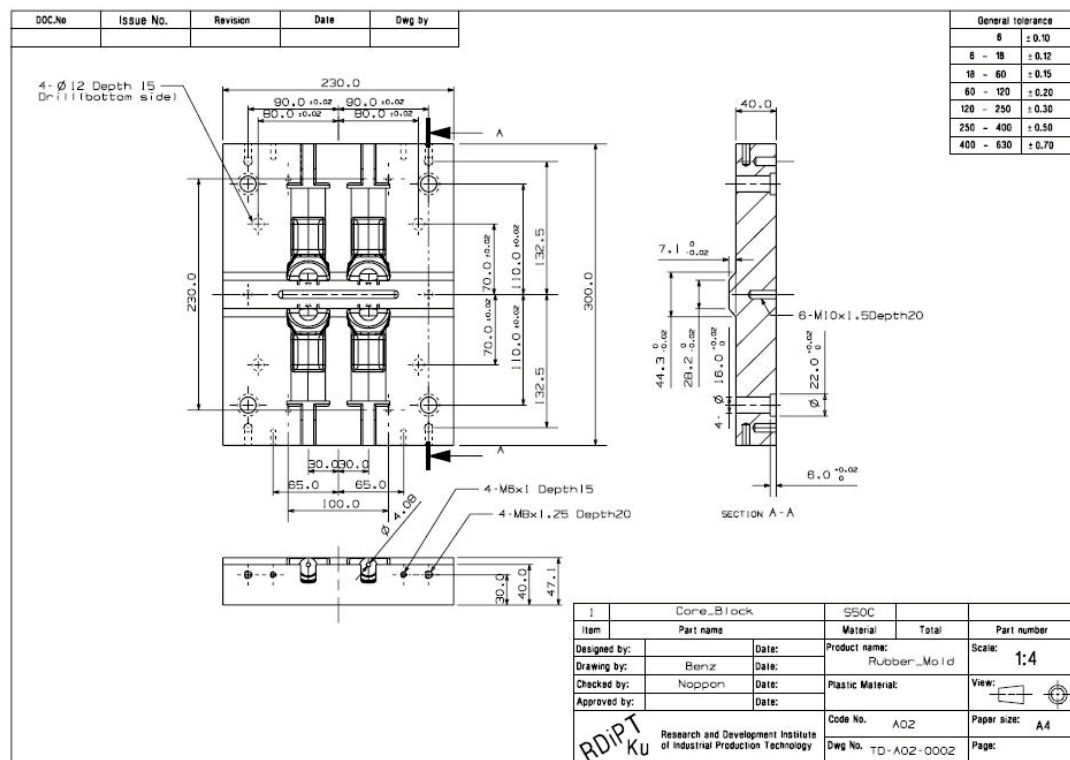
การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดในการทดสอบกับเครื่องฉีดยาง โดยมีจำนวนของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์อยู่ 4 เบ้า มีลักษณะทางวิ่งแบบวงกลม ขนาด 4 มิลลิเมตร และลักษณะรูเข้าแบบเข้าด้านข้าง (side gate) ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนชุดสไลด์ ซึ่งใช้ในการขึ้นรูปส่วนอันเดอร์คัท (under cut) โดยมีแผ่นร่อนนำในการประกบอินเสิร์ตเข้ากับแม่พิมพ์ โดยส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ และภาพแม่พิมพ์จริงดังแสดงในภาพที่ 104 ถึง 107



ภาพที่ 104 ลักษณะรูเข้า



ภาพที่ 105 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



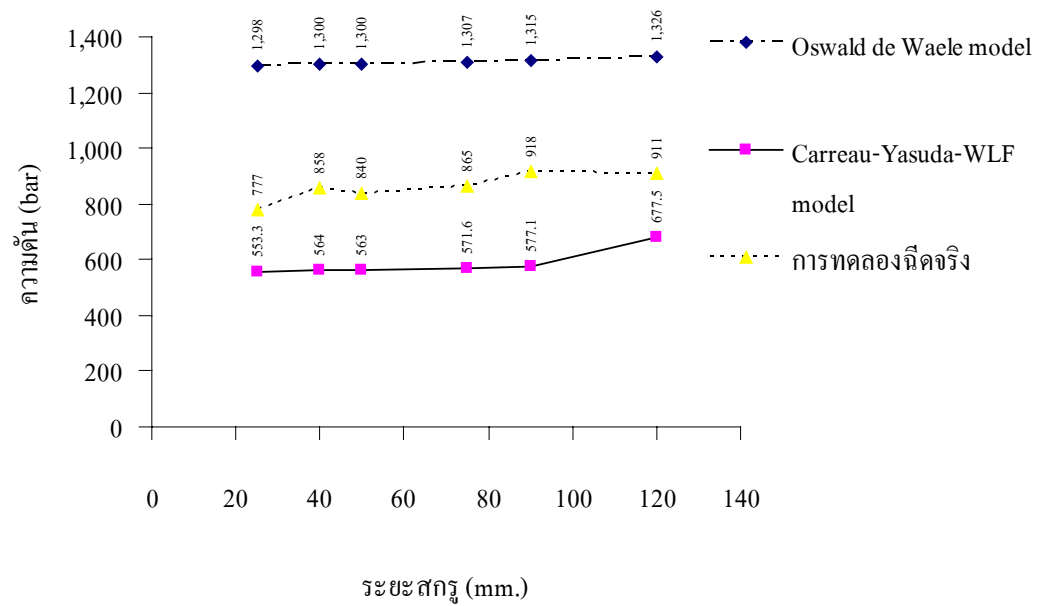
ภาพที่ 106 แผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ (core plate)

ที่มีขนาดเล็กนั้นมีจำนวนชั้นของอีลิเมนต์ (layer) 3 ชั้น ทำให้การคำนวณแรงดันเฉือนของโปรแกรมมีค่ามากกว่าการทดลองจริง ซึ่งการแบ่งชั้นอีลิเมนต์ที่มากขึ้นจะทำให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามการแบ่งชั้นที่มากขึ้นจะทำให้การคำนวณใช้เวลานานยิ่งขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของยางที่ใส่ในโปรแกรมส่งผลให้ค่าความหนืด (Viscosity) ที่ใช้ในโปรแกรมมีค่าสูงกว่าที่ใช้ในการทดลองจริง

เมื่อพิจารณาลักษณะของการไหลของการฉีดยางนั้นการไหลจะเป็น Second Newtonian Plateau ซึ่งในการใช้โปรแกรม 3D-SIGMA จะสามารถที่จะเลือกการทำนายค่าของความหนืดได้หลายแบบจำลองซึ่งได้เลือกใช้แบบจำลองของ Oswald de Waele model และ Carreau-Yasuda-WLF model ซึ่งในการใช้ Oswald de Waele model ค่าของความดันที่ได้สูงสุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการนั้นจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริงดังแสดงในตารางที่ 11 เนื่องจากลักษณะของการประมาณค่าของความหนืดในช่วงอัตราการเฉือนที่สูงนั้นจะใช้ค่าสุดท้ายของความหนืดที่ทดสอบในการประมาณค่าซึ่งจะทำให้ค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนที่สูงขึ้นจากจุดนี้จะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ตลอด และเมื่อใช้ Carreau-Yasuda-WLF model ในการประมาณค่าความหนืดผลที่ได้มีค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการนั้นค่าจะต่ำกว่าความดันที่ได้จากการทดลองจริงดังแสดงในตารางที่ 11 เนื่องจากการประมาณค่าในช่วงของ Second Newtonian Plateau ของแบบจำลองนี้จะมีค่าที่ลดต่ำลงมาซึ่งจะทำให้ค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนสูงที่เกิดขึ้นมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่เป็นจริง และเมื่อนำความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกันจะแสดงไว้ในภาพที่ 108

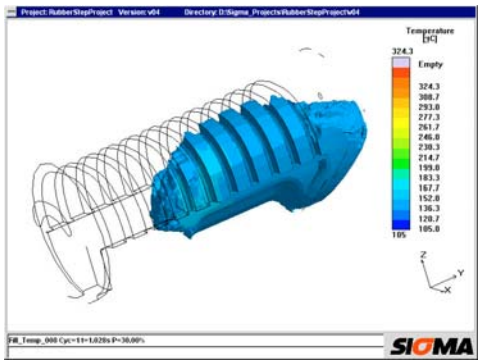
ตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบความดันสูงสุดที่เกิด

ระยะสกรู (mm.)	Oswald de Waele model (bar)	Carreau-Yasuda- WLF model (bar)	การทดลองจริง (bar)
25	1,298	553.3	777
40	1,300	564	858
50	1,300	563	840
75	1,307	571.6	865
90	1,315	577.1	918
120	1,326	677.5	911

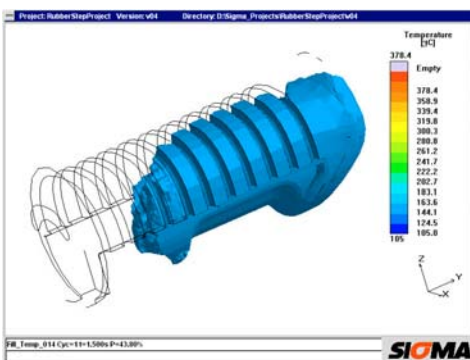
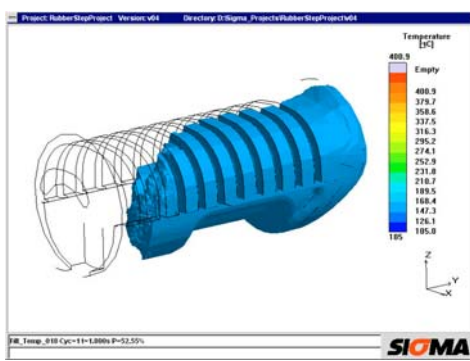


ภาพที่ 108 เปรียบเทียบความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ระยะสกรูต่าง ๆ

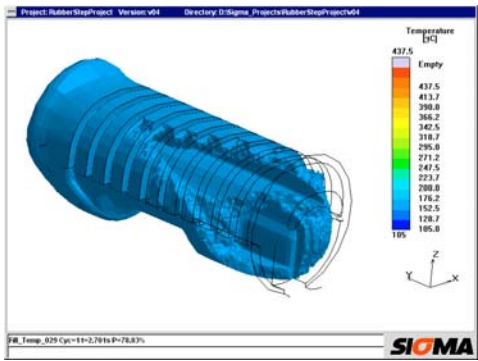
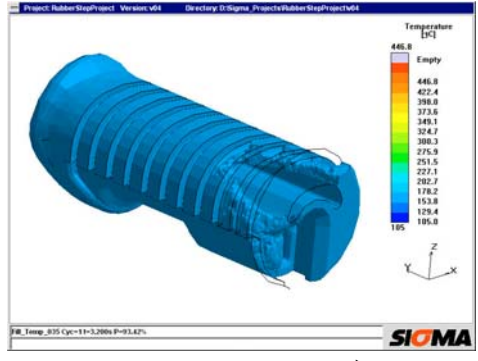
ตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยาง แรงดันนืด และเวลานืด

ระยะ สกรู	การจำลองด้วยโปรแกรม	การทดลองนืดจริง
25 mm	 แรงดันนืด 1298 บาร์ เวลานืด 1.028 วินาที	 แรงดันนืด 777 บาร์ เวลานืด 1.02 วินาที

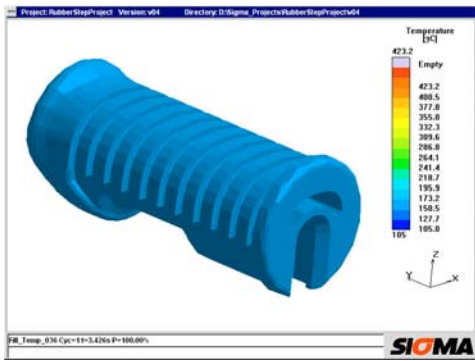
ตารางที่ 12 (ต่อ)

ระยะ สกรู	การจำลองด้วยโปรแกรม	การทดลองจริง
40 mm	 แรงดันฉีด 1300 บาร์ เวลาฉีด 1.500 วินาที	 แรงดันฉีด 858 บาร์ เวลาฉีด 1.49 วินาที
50 mm	 แรงดันฉีด 1300 บาร์ เวลาฉีด 1.800 วินาที	 แรงดันฉีด 840 บาร์ เวลาฉีด 1.83 วินาที

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ระยะ สกรู	การจำลองด้วยโปรแกรม	การทดลองจริง
75 mm	 แรงดันฉีด 1307 บาร์ เวลาฉีด 2.701 วินาที	 แรงดันฉีด 865 บาร์ เวลาฉีด 2.69 วินาที
90 mm	 แรงดันฉีด 1315 บาร์ เวลาฉีด 3.200 วินาที	 แรงดันฉีด 918 บาร์ เวลาฉีด 3.18 วินาที

ตารางที่ 12 (ต่อ)

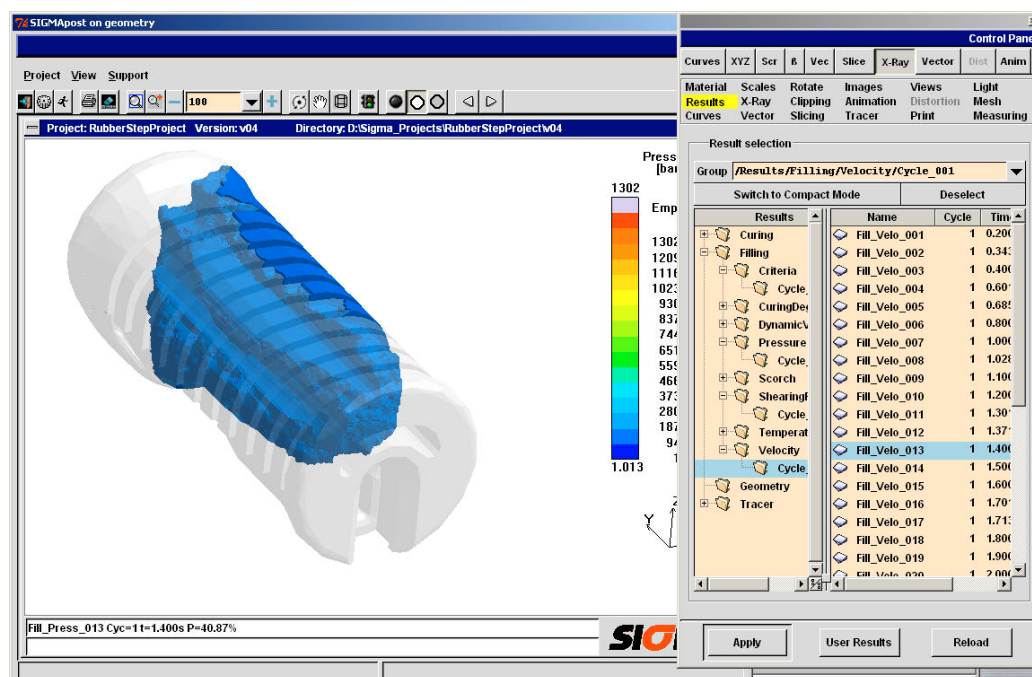
ระยะ สกรู	การจำลองด้วยโปรแกรม	การทดลองจริง
120 mm	 แรงดันฉีด 1326 บาร์ เวลาฉีด 3.426 วินาที	 แรงดันฉีด 911 บาร์ เวลาฉีด 4.19 วินาที

ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

ผลของโปรแกรม 3D-SIGMA ดังแสดงในภาพที่ 109 โดยได้ทำการสรุปผลที่ได้จากโปรแกรม 3D-SIGMA ดังนี้

1. ระยะเวลาที่ยางสัมผัสอากาศ (air contact)
2. ระยะเวลาฉีด (filled time)
3. ความยาวของการไหล (flow length)
4. อายุของยาง (material age)
5. ระยะเวลาที่ยางสัมผัสผิวแม่พิมพ์ (wall contact)
6. รอยต่อ (weldline)
7. แสดงผลการไหลของอนุภาคยาง (tracers)
8. อุณหภูมิของยางขณะฉีด (injection temperature)
9. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (mould temperature)
10. แรงดันฉีด (injection pressure)

11. ความเร็วฉีด (injection velocity)
12. อัตราการเฉือน (shearing rate)
13. การเปลี่ยนแปลงของเนื้อยางหลังการฉีดเต็ม (scorch index)
14. การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน (curing rate)



ภาพที่ 109 หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม 3D-SIGMA

1. ระยะเวลาที่ยางสัมผัสอากาศ (air contact)

ภาพที่ 110 แสดงระยะเวลาของยางที่สัมผัสกับอากาศเห็นได้ว่าการสัมผัสอากาศของยางนั้นจุดที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่ 0.0896 วินาที ซึ่งจะมีโอกาสที่จะทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดโพรงอากาศหรือมีอากาศอื่นที่บริเวณผิวได้

2. ระยะเวลาฉีด (filled time)

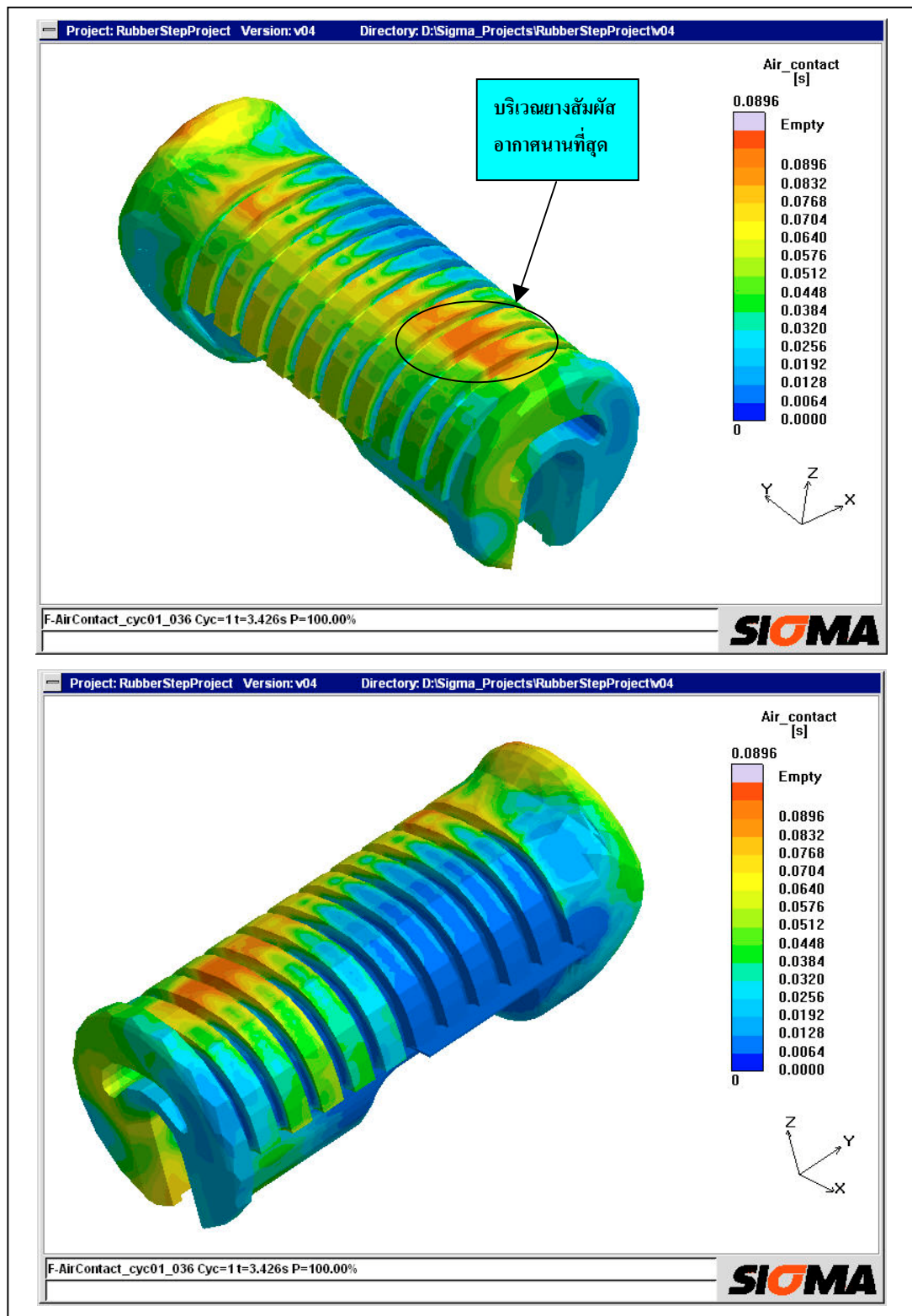
ภาพที่ 111 แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาที่ยางถูกฉีดเข้าไปภายในแม่พิมพ์โดยที่ระยะเวลาของเนื้อยางในแต่ละส่วนจะไม่เท่ากัน ซึ่งในกรณีของแม่พิมพ์ที่มีหลายเบ้าระยะเวลาในการฉีดนั้นจะมีผลกระทบมากเนื่องจากเนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ระยะเวลาต่างกันมากจึงมีโอกาสที่เนื้อยางที่ไหลเข้าไปก่อนจะเกิดการสุกตัวก่อน

3. ความยาวของการไหล (flow length)

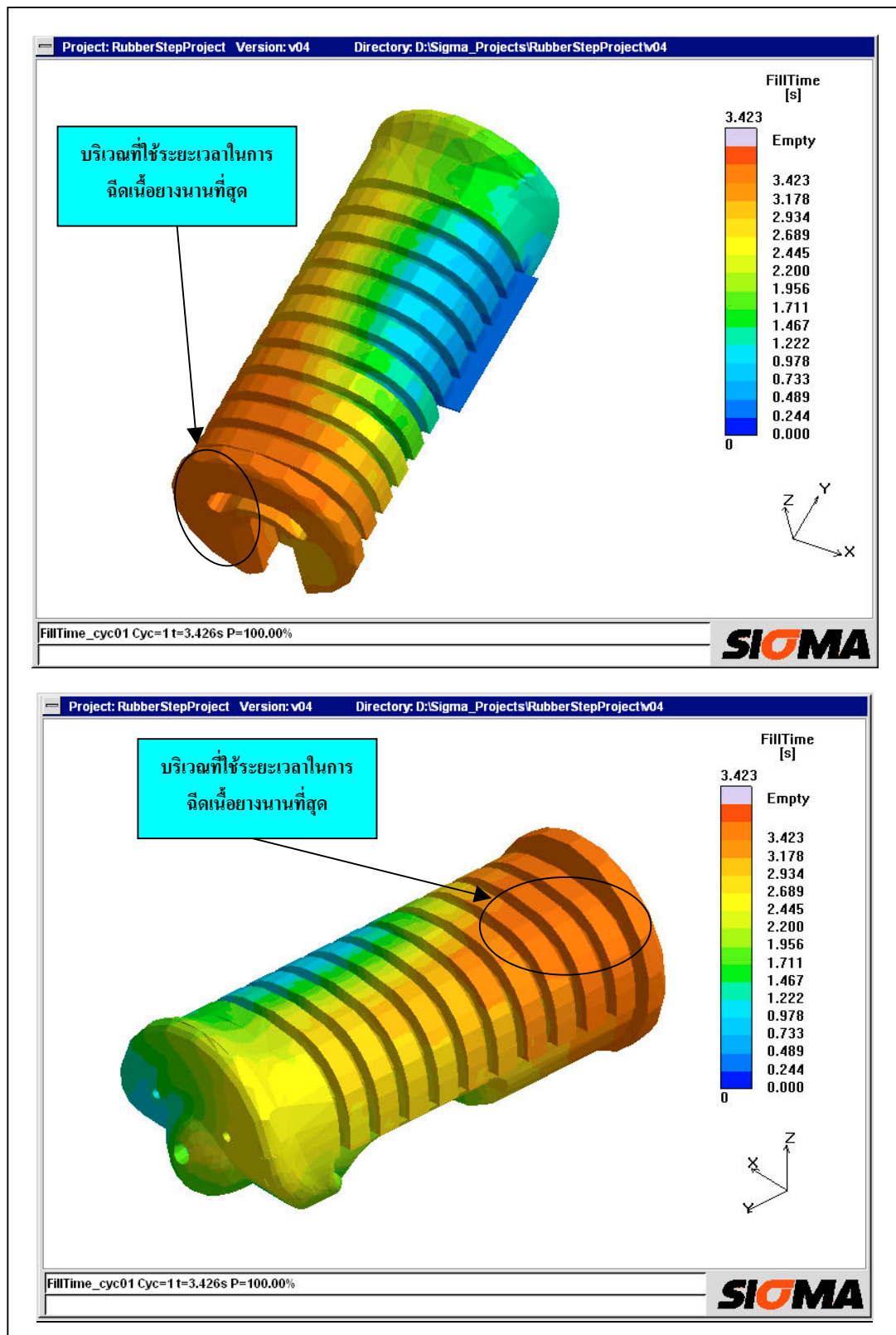
ภาพที่ 112 แสดงระยะทางของยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ถ้าชิ้นงานมีระยะการไหลที่ยาวเกินไปหรือรูปทรงที่ซับซ้อนอาจจะทำให้ชิ้นงานฉีดไม่เต็มได้

4. อายุของยาง (material age)

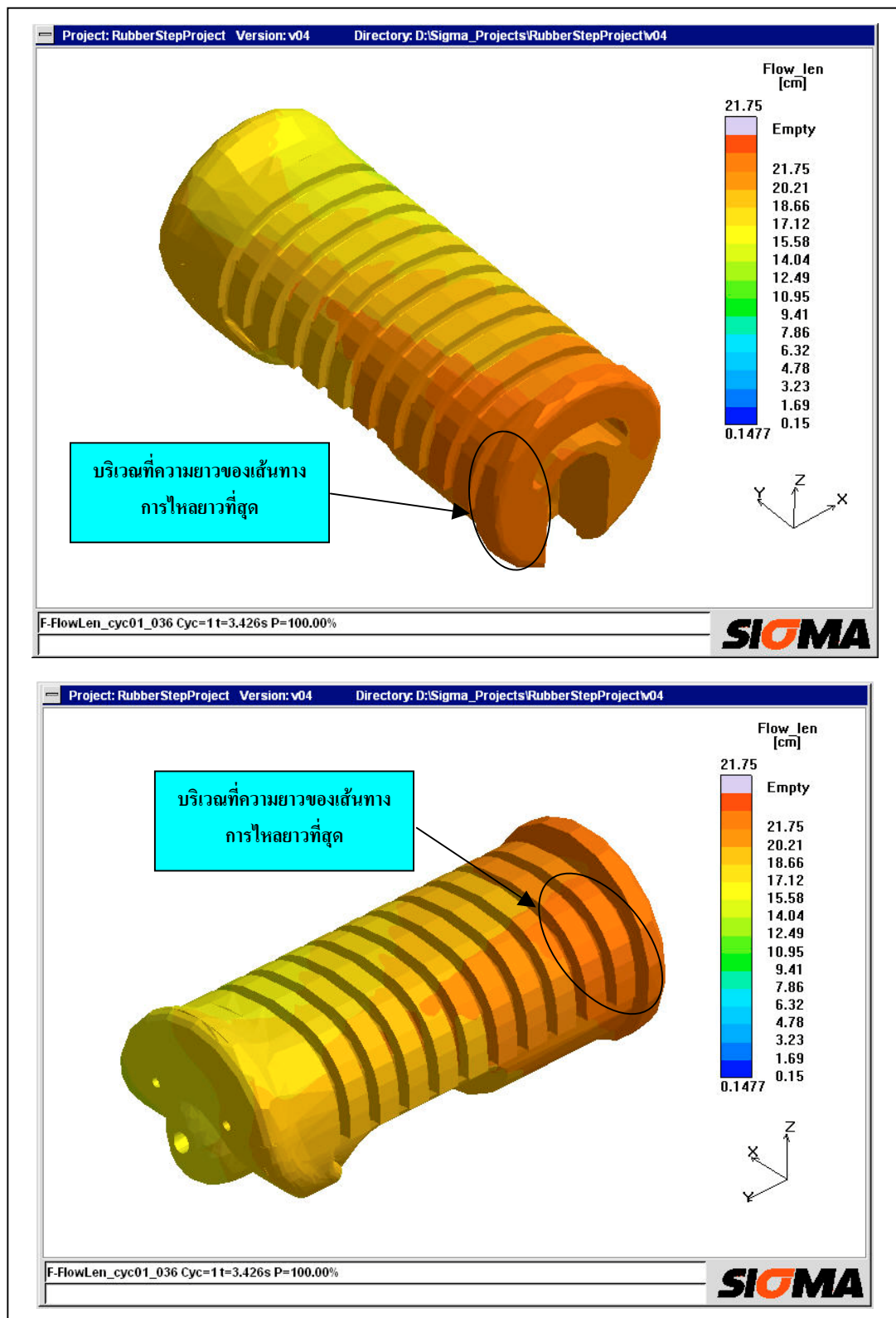
ภาพที่ 113 แสดงถึงอายุของยางที่อยู่ในแต่ละส่วนของชิ้นงาน เนื้อยางที่ไหลเข้ามาก่อนจะมีอายุมากกว่า ถ้าแม่พิมพ์ที่ทำการฉีดมีขนาดที่ใหญ่หรือหลายเบ้าอายุของยางจะมีผลสำคัญเนื่องจากยางที่มีอายุที่มากจะมีโอกาสที่จะสุกตัวก่อน



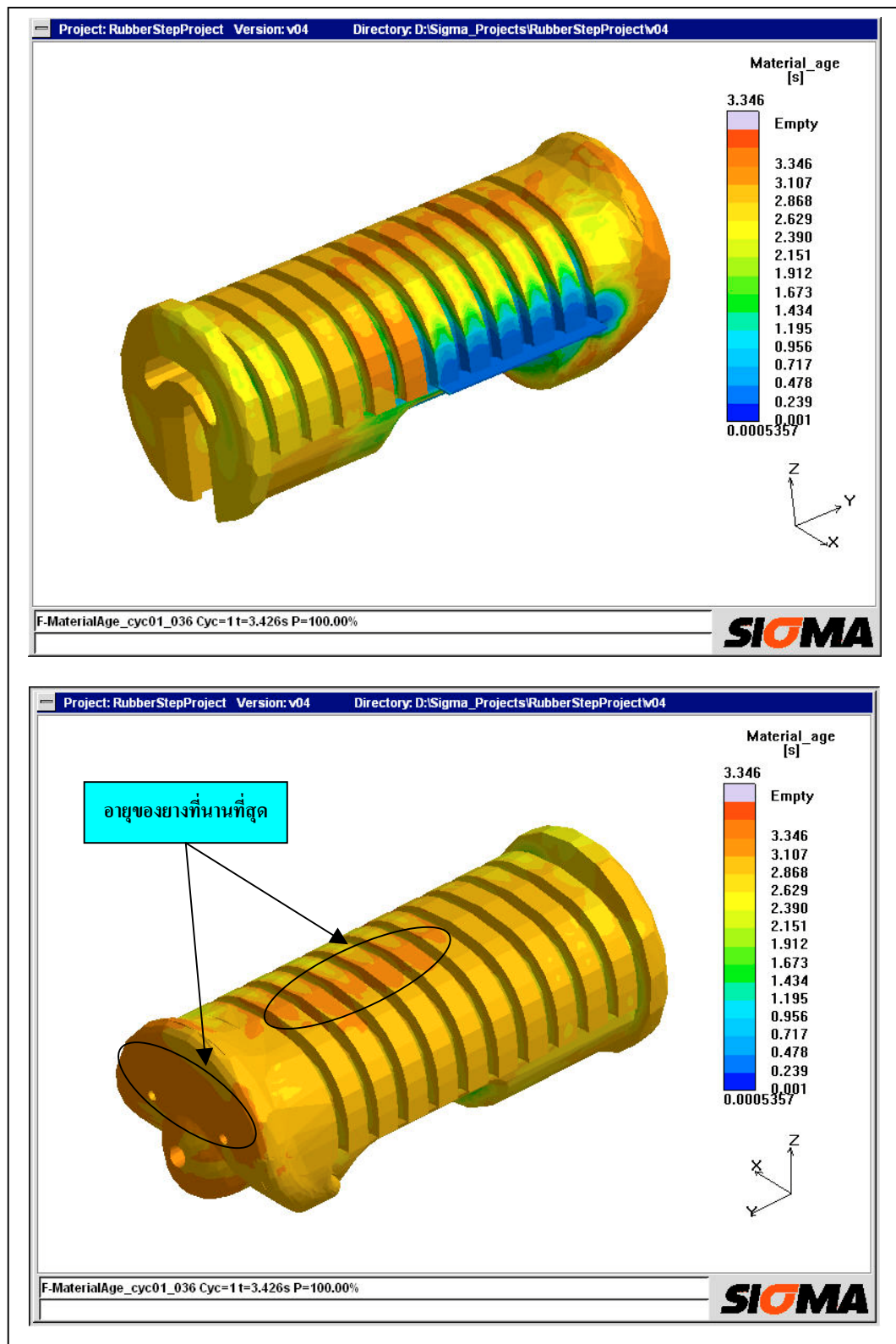
ภาพที่ 110 แสดงผลของระยะเวลาที่ยางสัมผัสอากาศ (air contact)



ภาพที่ 111 แสดงผลของระยะเวลาฉีดในแต่ละส่วนของชิ้นงาน



ภาพที่ 112 แสดงผลความยาวของเส้นทางการไหลของยาง



ภาพที่ 113 แสดงอายุของยางในแต่ละส่วนของชิ้นงาน

5. ระยะเวลาที่ย่างสัมผัสผิวแม่พิมพ์ (wall contact)

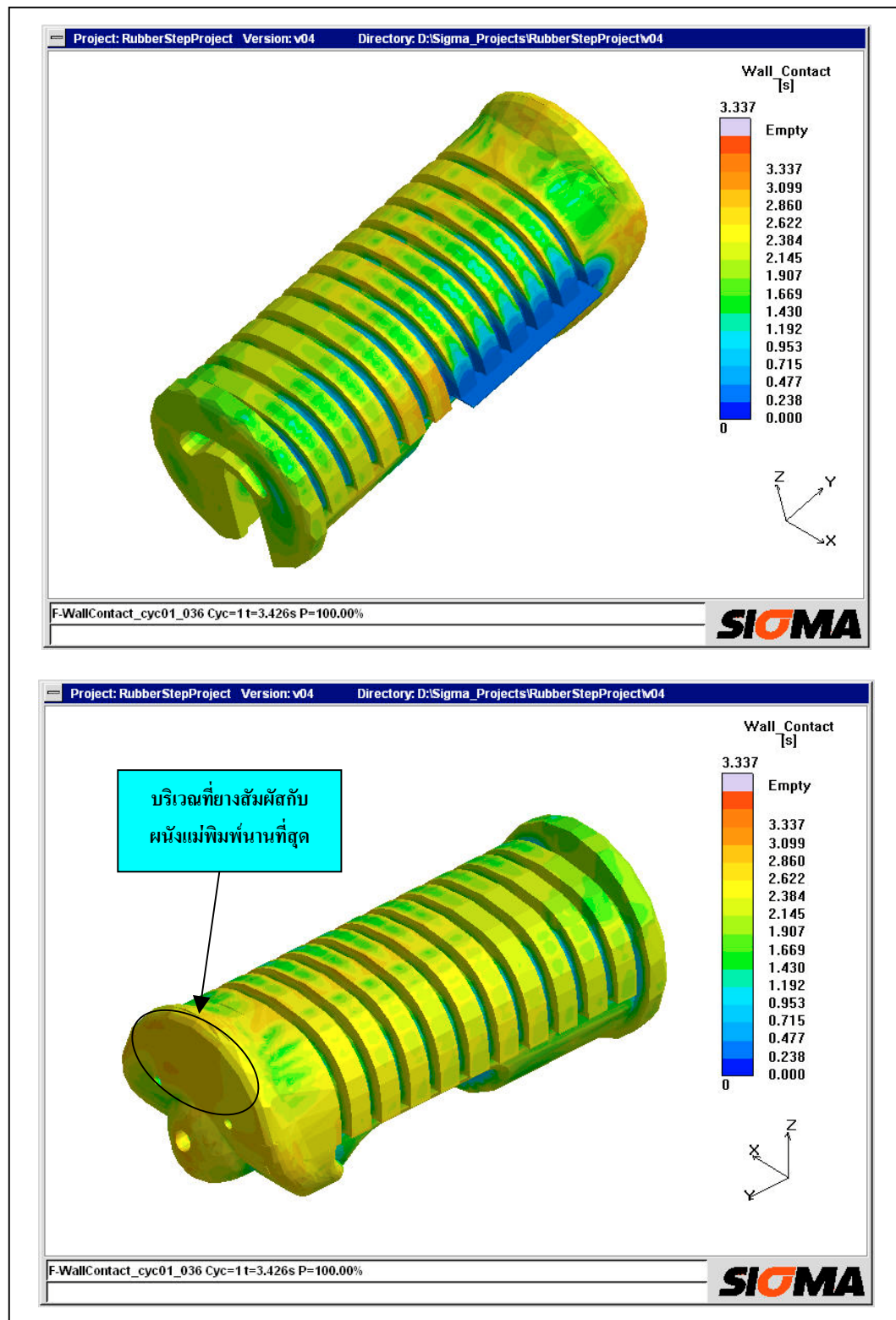
ภาพที่ 114 แสดงผลของเวลาที่ย่างสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ ซึ่งระยะเวลาในการสัมผัสของเนื้อยางกับผนังของแม่พิมพ์มากนั้นจะทำให้บริเวณนั้นได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์นานกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งอาจจะทำให้ยางเกิดการสุกตัวก่อนบริเวณอื่นได้

6. รอยต่อ (weldline)

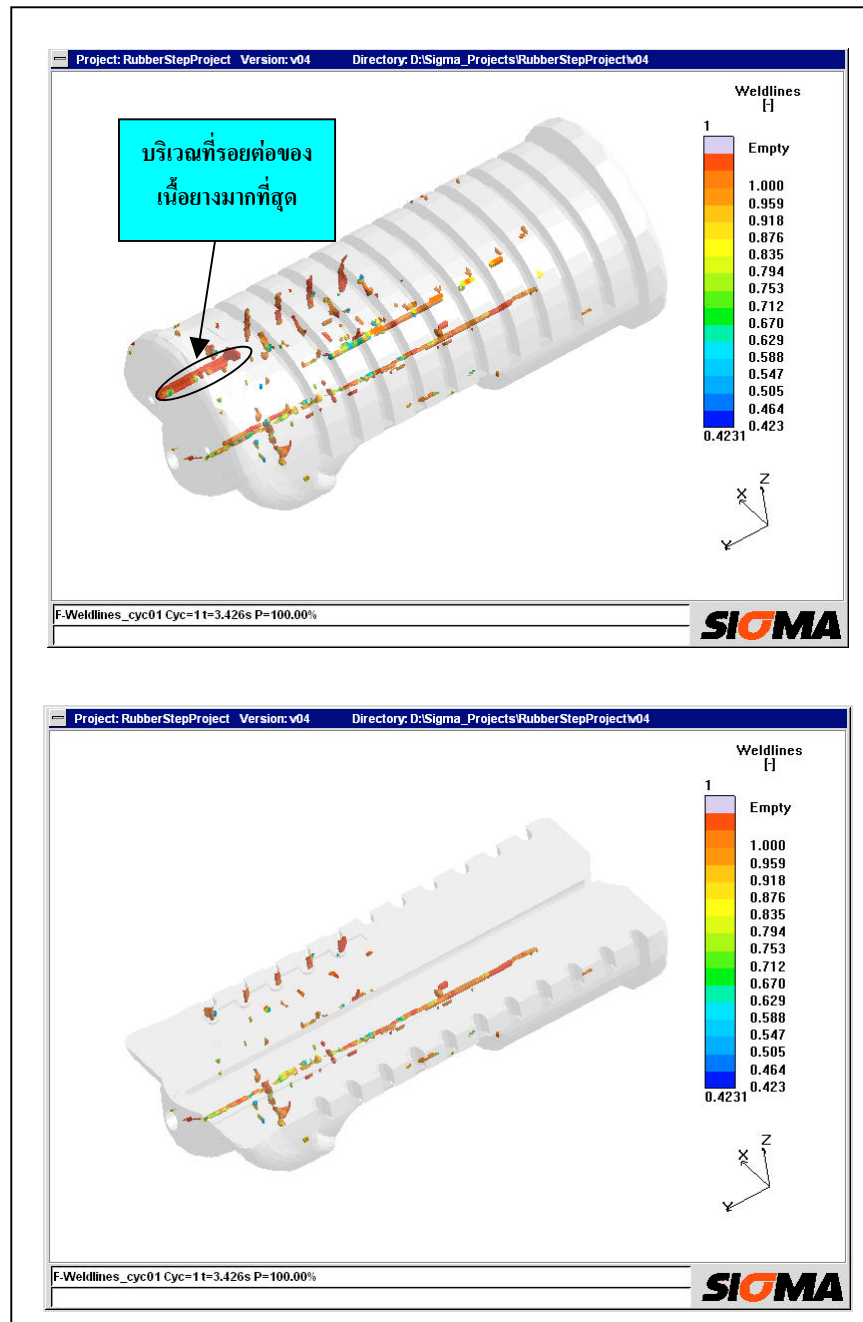
ภาพที่ 115 แสดงรอยต่อของเนื้อยางที่อาจเกิดขึ้นซึ่งจะแสดงให้เห็นจุดของยางที่เชื่อมต่อกันซึ่งอาจทำให้บริเวณนี้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น โพรงอากาศ รอยการต่อกันในชิ้นงาน จากรูปดังนั้นจะเห็นได้ว่าจะเกิดที่บริเวณผิวแต่ส่วนใหญ่จะเกิดภายในผิวของชิ้นงาน

7. แสดงผลการไหลของอนุภาคยาง (tracers)

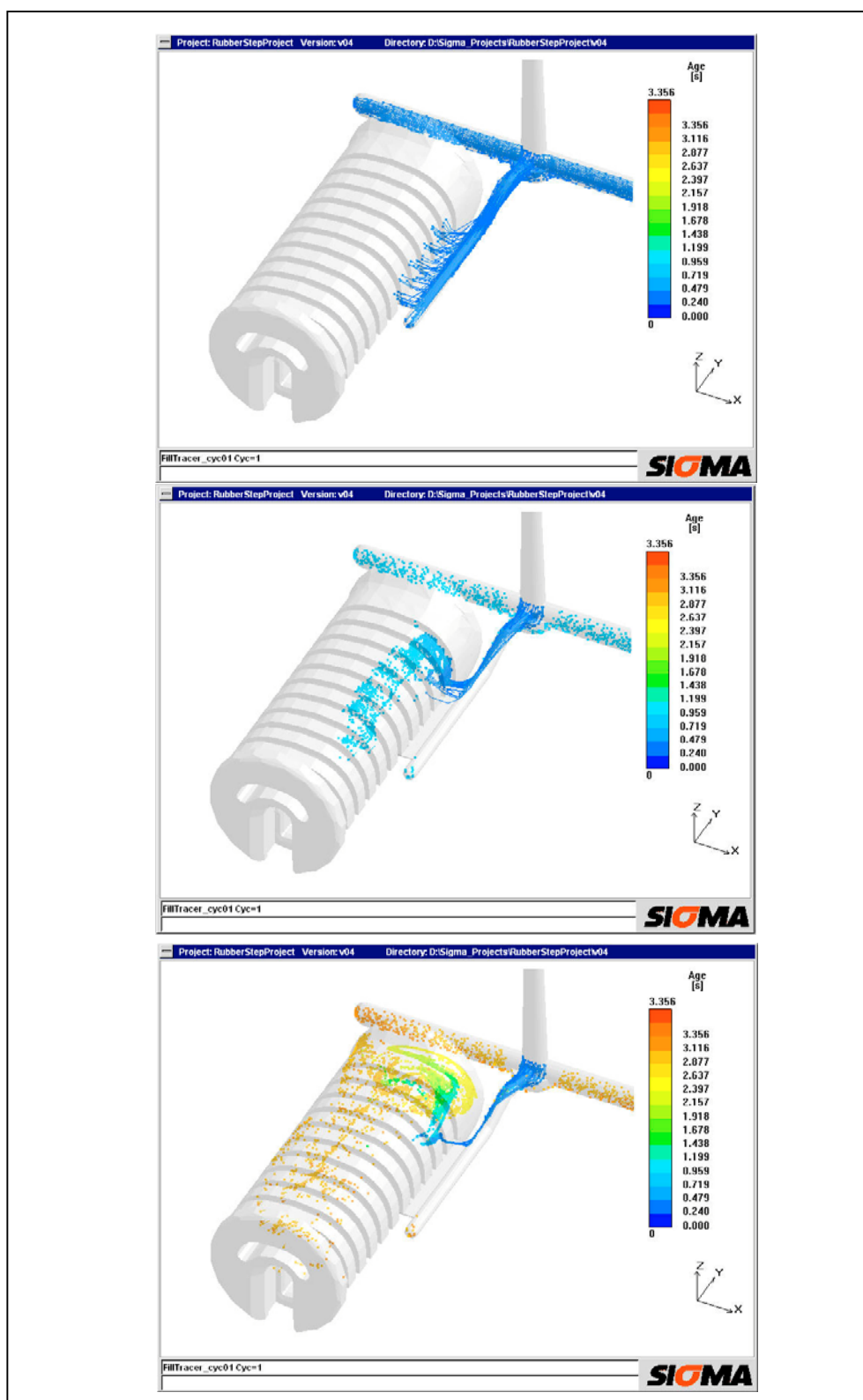
การไหลเข้าไปของเนื้อยางนั้นสามารถดูได้จากภาพที่ 116 ซึ่งจะแสดงให้เห็นลักษณะทิศทางของการไหลของอนุภาคของยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์ จากภาพจะเห็นได้ว่าอนุภาคของยางไหลไปตามช่องทางวิ่งแล้วจึงไหลเข้าไปภายในรูซึ่งอนุภาคของยางนั้นไหลเข้าไปในนั้นใกล้เคียงกันตลอดหน้าตัดของรูเข้า ต่อจากนั้นเนื้อยางจะไหลไปในส่วนหัวของชิ้นงานก่อนแล้วไหลกลับย้อนออกมาที่บริเวณด้านปลายของชิ้นงาน ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าเนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้นจะเต็มที่บริเวณด้านหัวก่อนแล้วค่อยมาเติมส่วนด้านหลังของชิ้นงาน



ภาพที่ 114 แสดงผลของเวลาที่ยางสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ (wall contact)



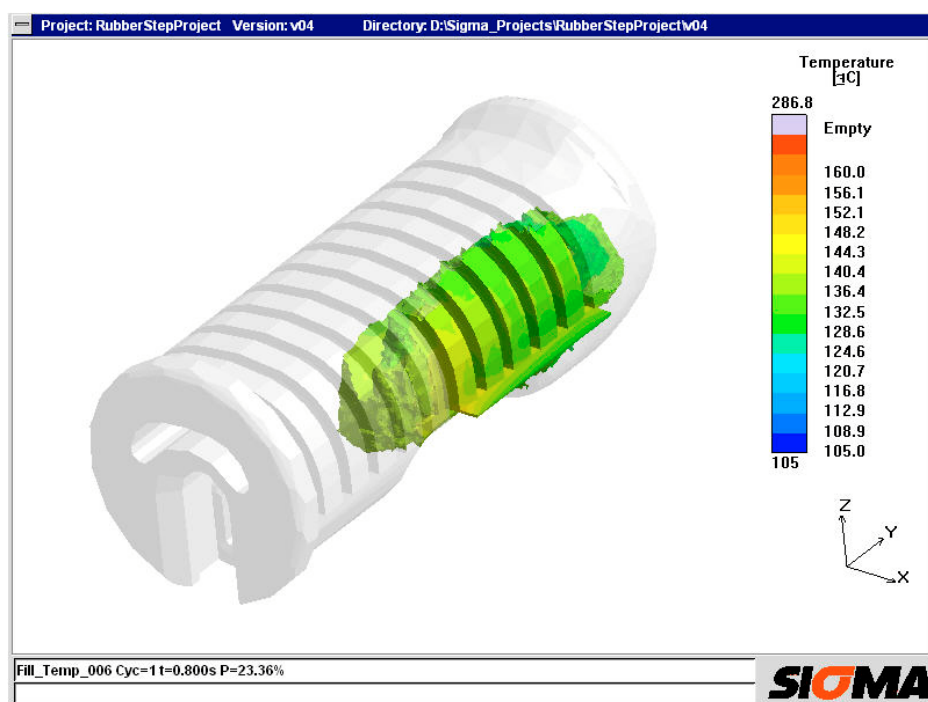
ภาพที่ 115 แสดงรอยต่อของเนื้อยางที่จะเกิดขึ้น (weldline)



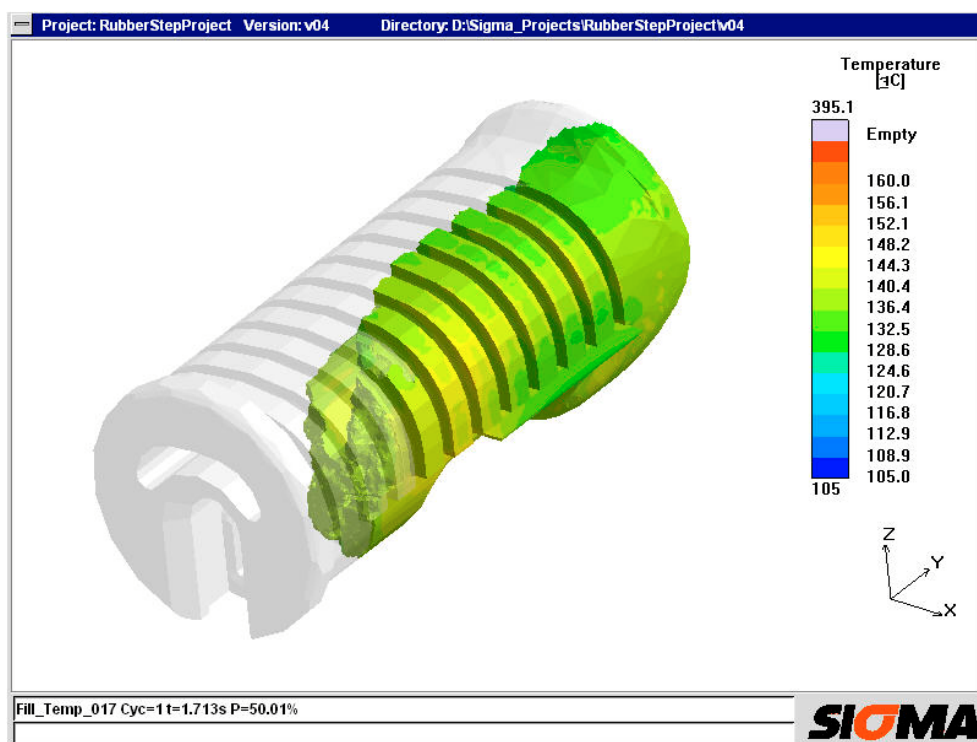
ภาพที่ 116 แสดงผลการไหลของอนุภาค (tracers) ของยาง

8. อุณหภูมิของยางขณะฉีด (injection temperature)

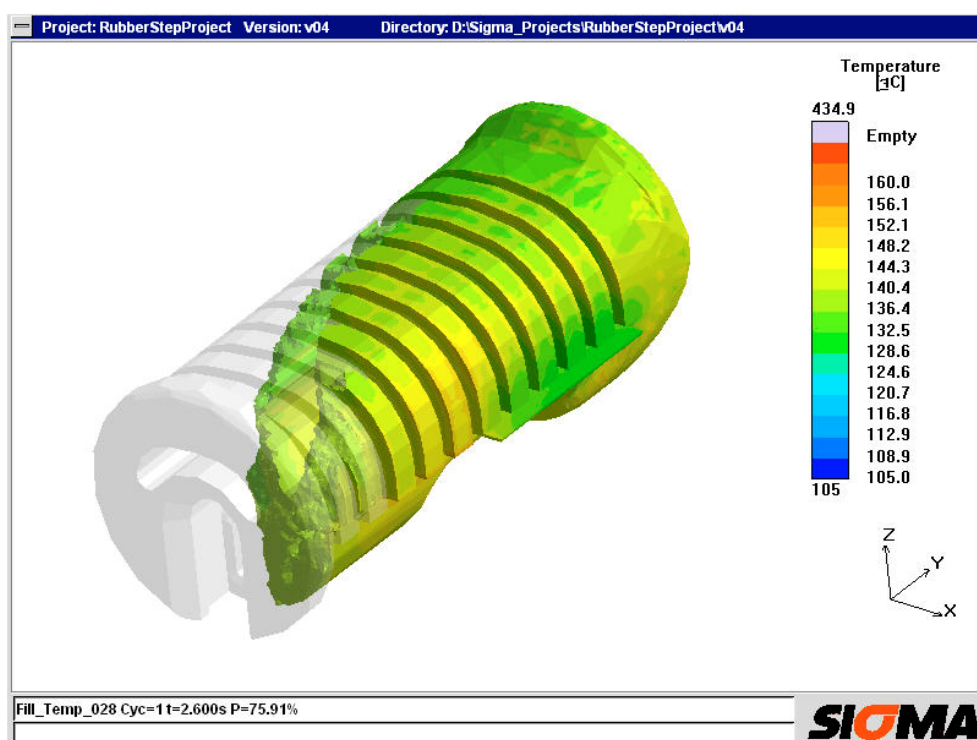
อุณหภูมิของเนื้อยางที่เกิดขึ้นในกระบวนการของการฉีดนั้นจะแสดงไว้ในภาพที่ 117 ถึง 120 ในภาพที่ 117 นั้นจะแสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 25% ของการฉีด อุณหภูมิของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้นอุณหภูมิจะอยู่ที่ 130 – 140 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินั้นค่อนข้างที่จะเท่ากันทั้งหมด และอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 50%, 75%, และ 100% ของการฉีด อุณหภูมิจะมีค่าที่ค่อนข้างที่จะเท่ากันที่ 140 – 150 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นงาน อุณหภูมิของยางนั้นมีส่วนต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์มาก ในการฉีดยางนั้นหากยางมีอุณหภูมิสูงก็จะสุกได้เร็วทำให้เวลาการผลิตต่อรอบลดลงได้ ซึ่งทำให้ลดต้นทุนลง อย่างไรก็ตามหากยางมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็อาจมีปัญหาในการผลิตได้เช่นกัน คือ อาจเกิดการสุกตัวของยางก่อนที่จะฉีดเต็ม ทำให้ชิ้นงานฉีดไม่เต็มหรือมีผลต่อคุณภาพชิ้นงานได้ หรือหากชิ้นงานฉีดได้เต็มแต่หากมีอุณหภูมิสูงเกินไปก็อาจจะทำให้ยางนั้นเกิดการไหม้ได้ (over cure) เพราะฉะนั้นอุณหภูมิควรตั้งให้พอเหมาะ โดยขึ้นกับสูตรของยางที่ผสมออกมา ซึ่งหากใช้โปรแกรมในการจำลองก่อนจะสามารถทำให้ทราบค่าของอุณหภูมิที่จะใช้และเวลาได้ ก่อนทำให้สามารถลดเวลาในการทดลองได้



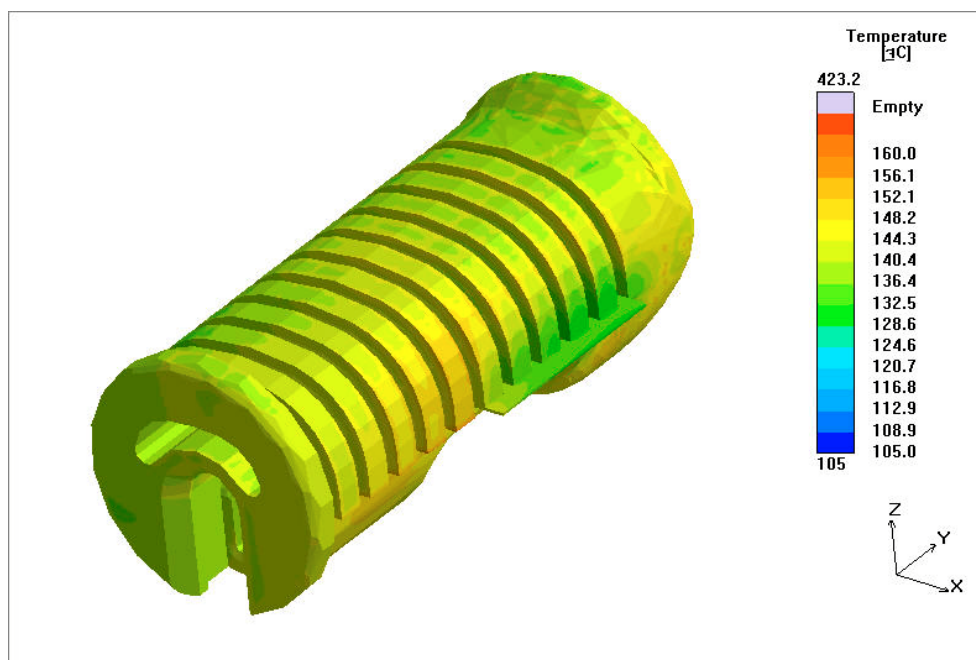
ภาพที่ 117 แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 25% ของการฉีด



ภาพที่ 118 แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 50% ของการฉีด

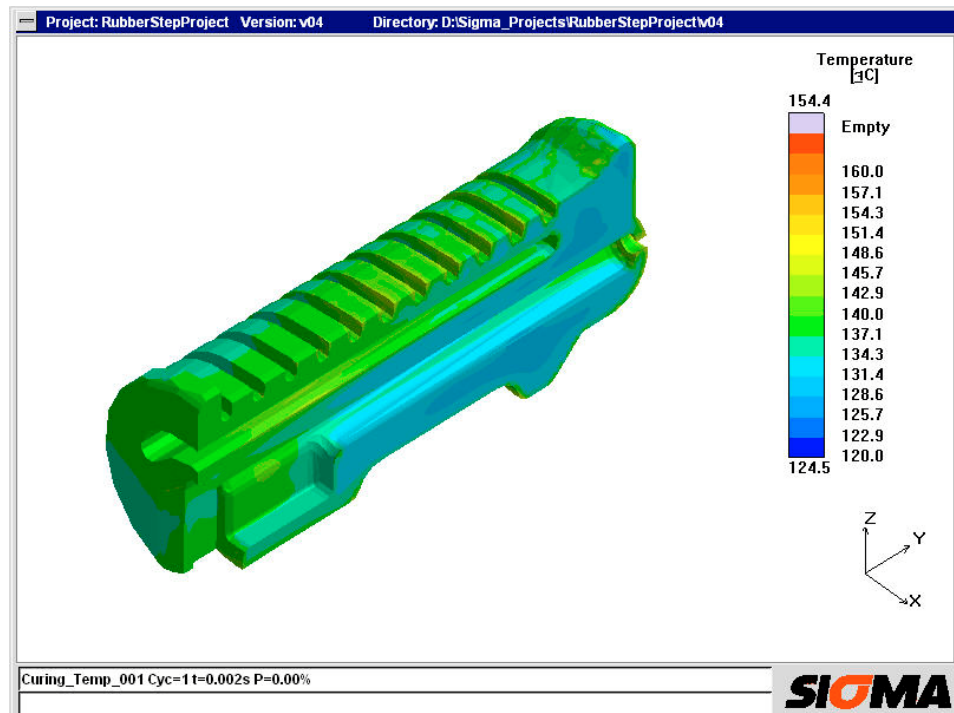


ภาพที่ 119 แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 75% ของการฉีด

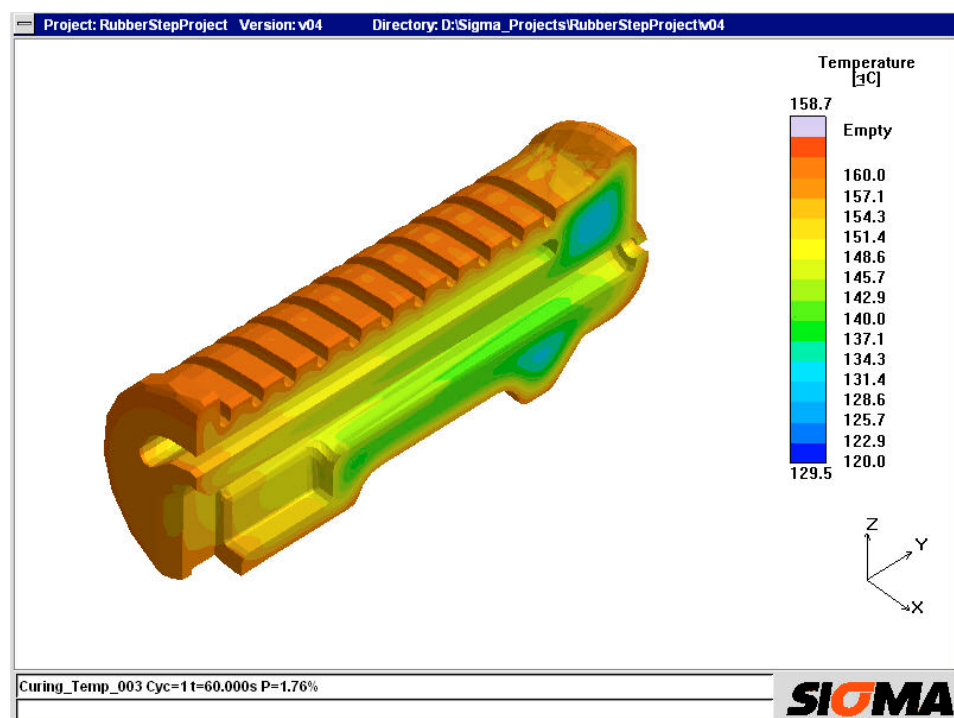


ภาพที่ 120 แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 100% ของการฉีด

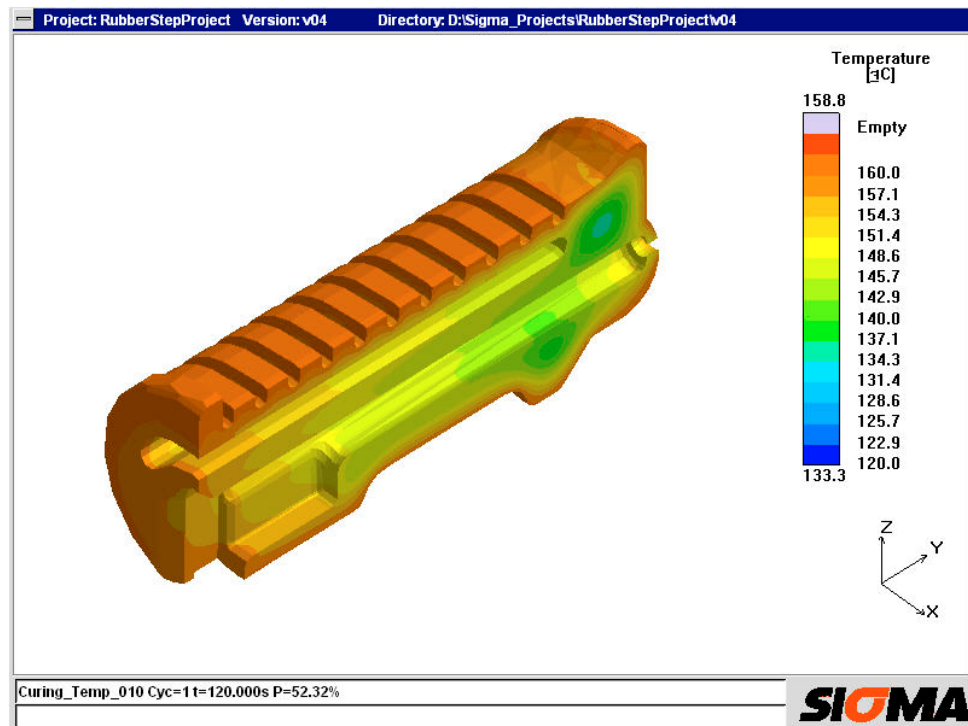
ภาพที่ 121 ถึง ภาพที่ 126 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอยู่ในช่วงอบบ่มตั้งแต่ที่เวลาเริ่มต้น คือ 0 วินาที (หลังจากชิ้นงานฉีดเต็มเบ้า) ถึง 300 วินาที โดยแสดงอุณหภูมิทุก 60 วินาที และได้ทำการตัดแบ่งชิ้นงานเพื่อสังเกตการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าที่เวลาเริ่มต้นในภาพที่ 121 ที่บริเวณผิวชิ้นงานที่สัมผัสแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส และภายในชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเวลา 60 วินาที ดังภาพที่ 122 จะเห็นได้ว่าที่บริเวณผิวชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิแม่พิมพ์ คือ 160 องศาเซลเซียส ส่วนภายในชิ้นงานอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 145 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเสร็จสิ้นการอบบ่มที่เวลา 300 วินาที ดังภาพที่ 123 ถึง 126 อุณหภูมิภายในชิ้นงานจะอยู่ที่ประมาณ 155 องศาเซลเซียส บริเวณที่มีความหนาของชิ้นงานมากอุณหภูมิจะกระจายตัวไปถึงได้ช้า และเนื่องจากสไลด์ไม่มีตัวทำความร้อนทำให้บริเวณภายในชิ้นงานอุณหภูมิสูงขึ้นช้าเพราะได้รับการถ่ายเทอุณหภูมิจากผิวแม่พิมพ์เพียงอย่างเดียว ทำให้ต้องใช้เวลาในการอบบ่มนาน อย่างไรก็ตามตัวสไลด์มีขนาดเล็ก การติดตั้งตัวทำความร้อนก็เป็นไปได้ยากทำให้การออกแบบมีความยากมากขึ้น



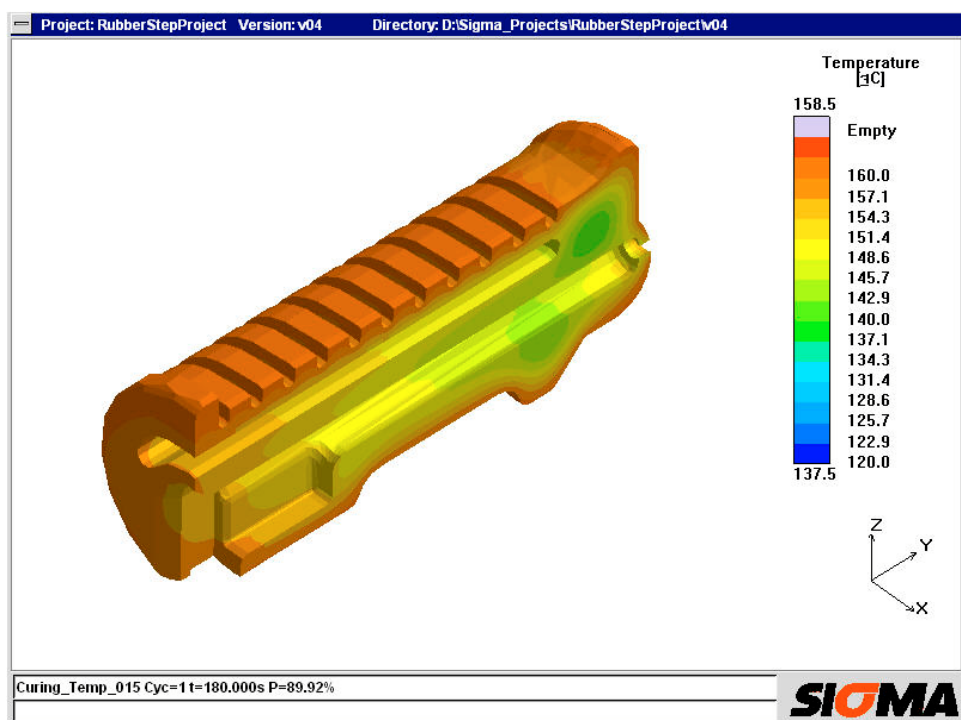
ภาพที่ 121 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)



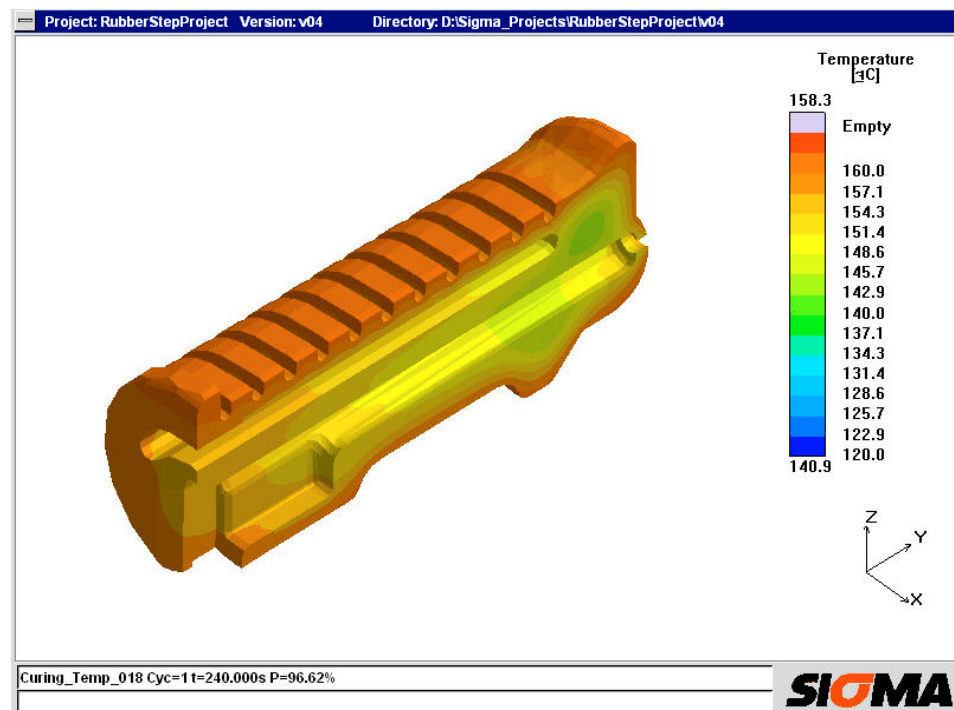
ภาพที่ 122 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 60 วินาที



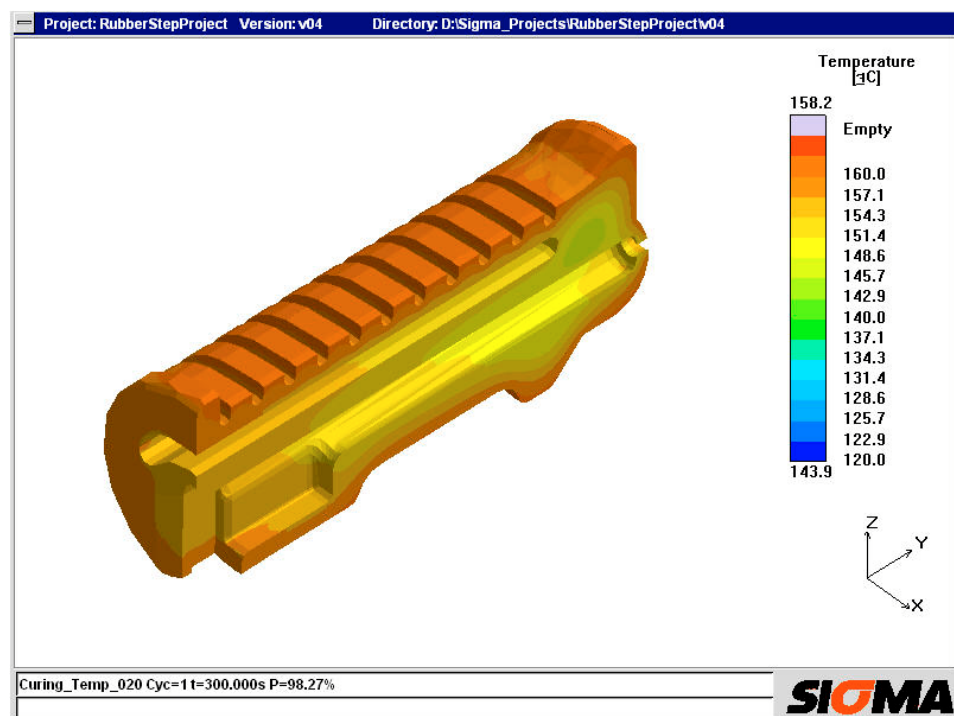
ภาพที่ 123 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 120 วินาที



ภาพที่ 124 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 180 วินาที



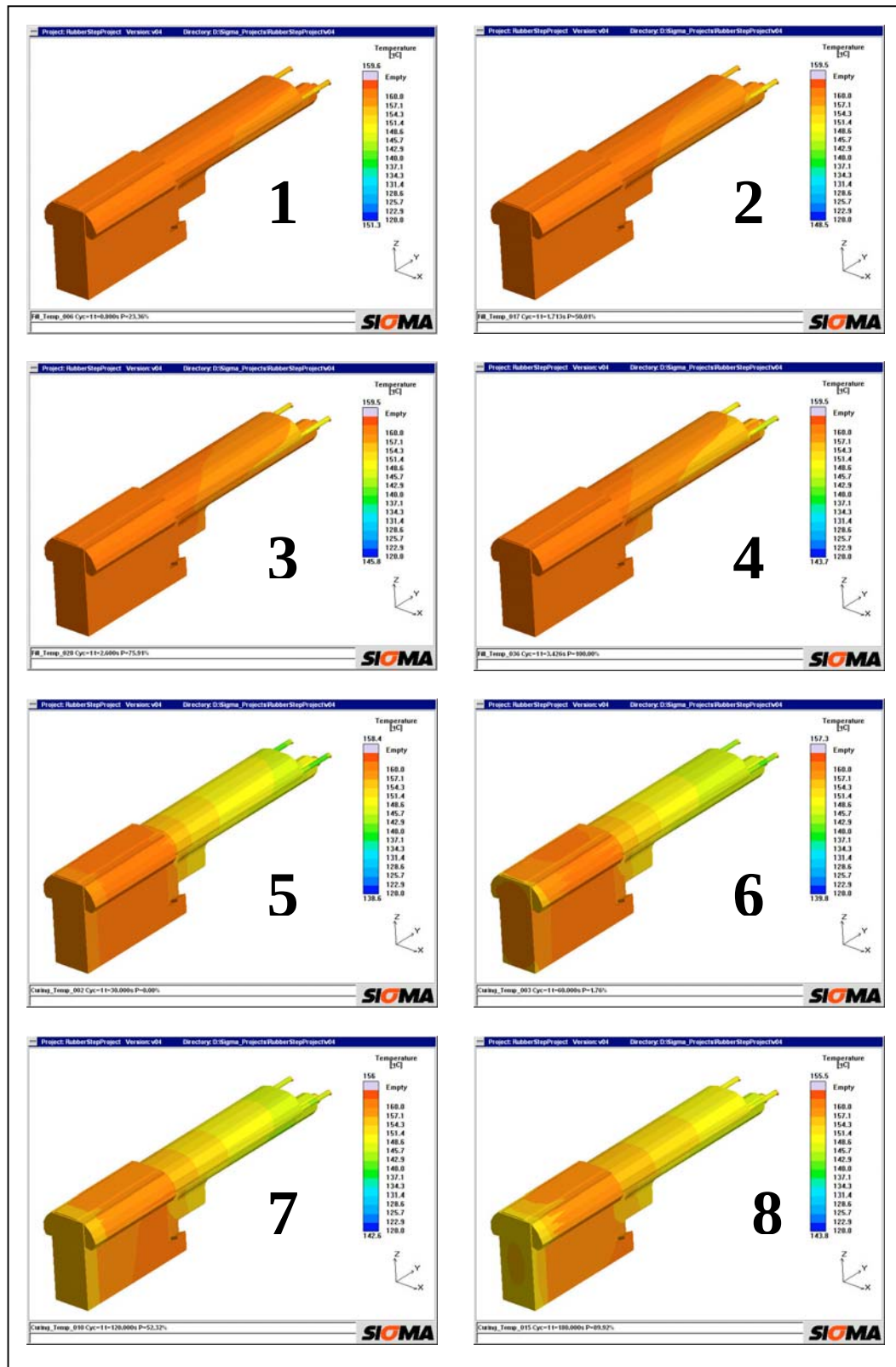
ภาพที่ 125 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 240 วินาที



ภาพที่ 126 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 300 วินาที

9. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (mould temperature)

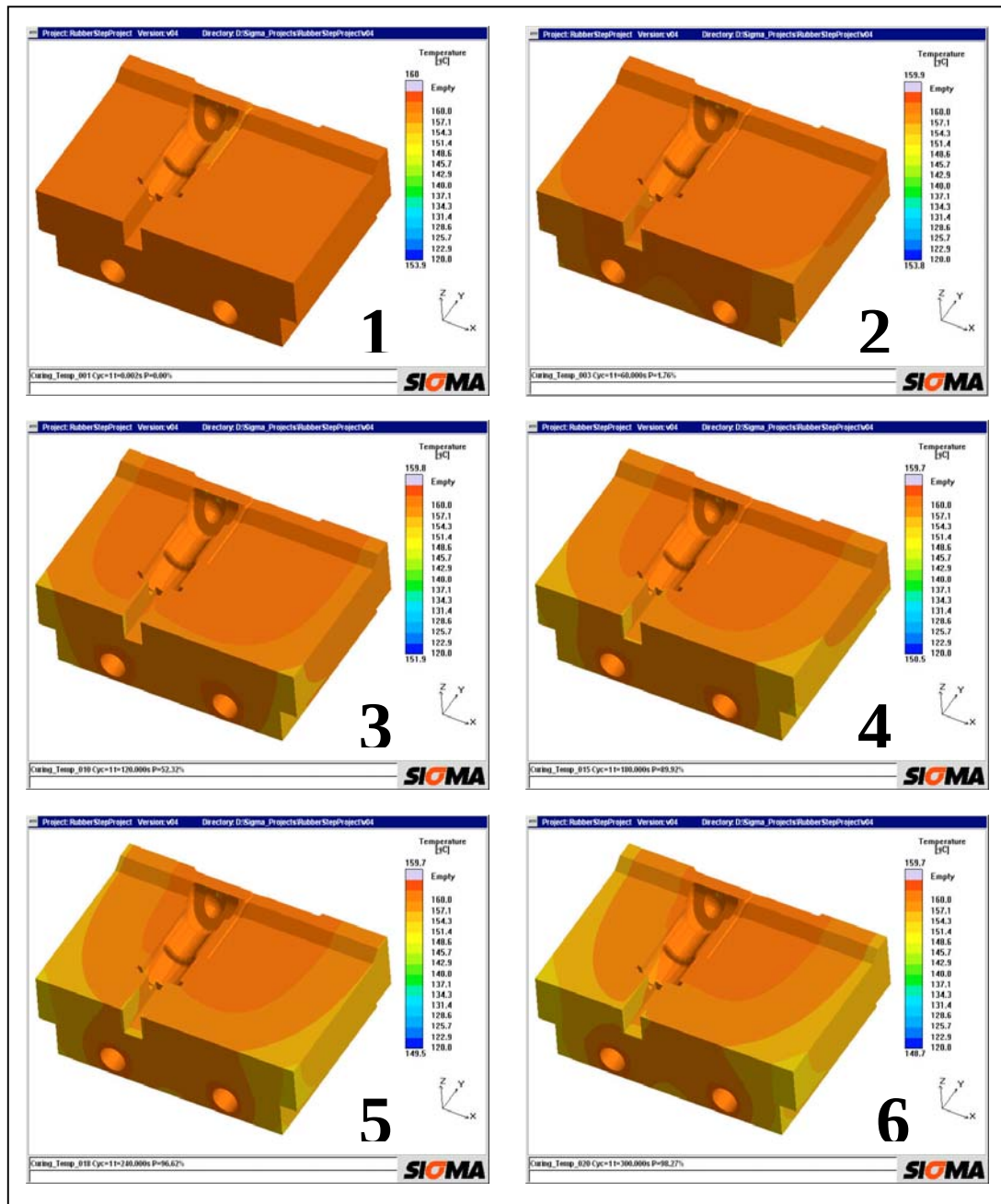
แม่พิมพ์ฉีดยางที่ใช้ในการทดลองมีการใส่แท่งความร้อน 4 ตัว โดยแบ่งเป็นแม่พิมพ์ส่วนบน 2 ตัว และแม่พิมพ์ส่วนล่างสองตัว โดยใช้ความร้อนที่ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งในการจำลองด้วยโปรแกรมก็ใช้ในลักษณะเดียวกันโดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใส่ไว้คือ 160 องศาเซลเซียส ทั้งในส่วนของแม่พิมพ์และสไลด์ อุณหภูมิของสไลด์ที่เวลาต่างๆในตอนเริ่มต้นของกระบวนการนั้นอุณหภูมิของตัวสไลด์นั้นจะมีอุณหภูมิที่สูงเนื่องจากได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ เนื่องจากไม่มีการติดตั้งตัวทำความร้อนให้แก่สไลด์ ในภาพที่ 127 นั้น แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสไลด์ตั้งแต่ฉีดจนกระทั่งขึ้นงานสุก ภาพที่ 127 (1) นั้นเป็นอุณหภูมิของสไลด์ที่เวลา 0.8 วินาที ที่ 25% ของการฉีด อุณหภูมิจะลดลงในส่วนที่สัมผัสกับเนื้อยางซึ่งอยู่ที่ช่วงปลายของสไลด์ และที่เวลา 1.7 วินาที ที่ 50% ของการฉีดนั้นเนื้อยางเริ่มเข้ามามากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของสไลด์ลดลงดังแสดงในภาพที่ 127 (2) และในภาพที่ 127 (3, 4) นั้นจะแสดงอุณหภูมิของสไลด์ที่เวลา 2.6 วินาที และ 3.42 วินาที ซึ่งเนื้อยางจะไหลเข้าไปเต็มแม่พิมพ์ อุณหภูมิของสไลด์จะลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากสไลด์ไปสู่เนื้อยาง เมื่อถึงกระบวนการของการบ่มนั้นอุณหภูมิของตัวสไลด์จะลดลงดังแสดงในภาพที่ 127 (5, 6, 7, 8) จะเป็นอุณหภูมิของสไลด์ที่เวลา 30, 60, 120 และ 180 วินาที จะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นจะค่อยๆลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับตัวขึ้นงานและความร้อนของแม่พิมพ์ที่ถ่ายเทมาให้แก่ตัวสไลด์จะถูกถ่ายเทไปยังเนื้อยางแทนแต่ในส่วนโคนของสไลด์นั้นยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่เนื่องจากในส่วนนี้เนื้อยางไม่ได้สัมผัสจึงมีความร้อนจากแม่พิมพ์ถ่ายเทให้



ภาพที่ 127 แสดงอุณหภูมิของสไลด์ของ 1 รอบการฉีด

ภาพที่ 128 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะทำการอบบ่มยาง (curing phrase)

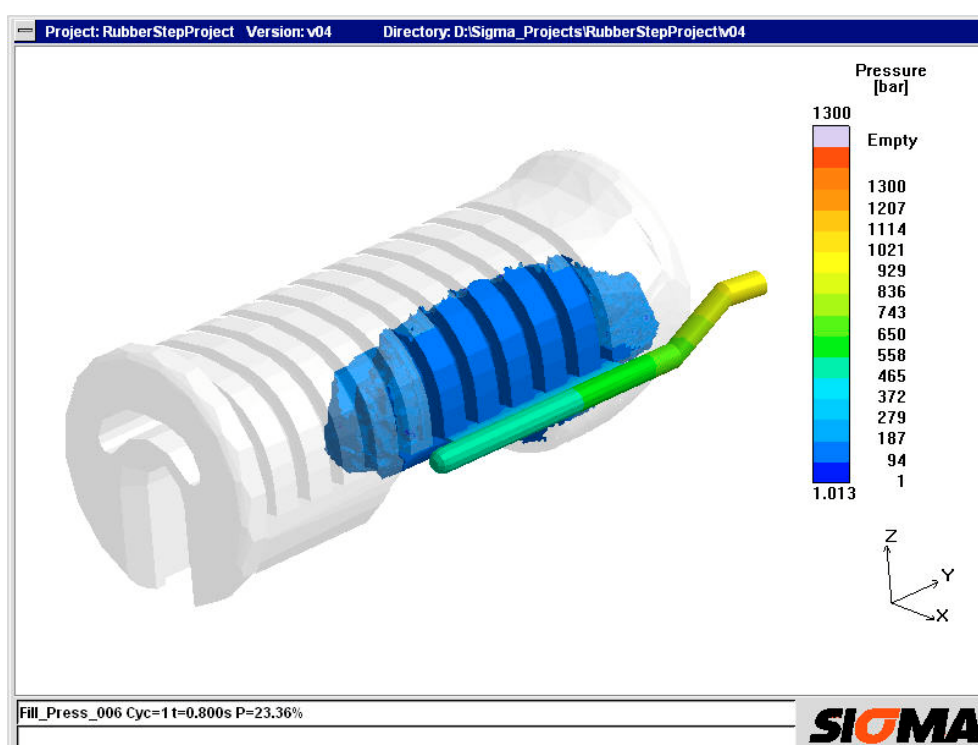
ในภาพที่ 128 (1) นั้นเป็นอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เวลาเริ่มต้นของกระบวนการของการบ่ม มีอุณหภูมิที่สูงประมาณ 160 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ในส่วนที่สัมผัสกับเนื้อยางจะอยู่ของแม่พิมพ์จะมีการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ให้แก่เนื้อยาง และที่เวลา 60 วินาทีของการบ่ม นั้นเนื้อยางจะรับความร้อนจากแม่พิมพ์และส่วนขอบนอกของแม่พิมพ์นั้น สัมผัสกับอากาศทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 128 (2) และในภาพที่ 128 (3, 4, 5) นั้นจะแสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เวลา 120, 180 วินาที และ 240 วินาที ซึ่งเนื้อยางจะรับความร้อนจากแม่พิมพ์จนเนื้อยางสุกตัวและ ส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะทำให้อุณหภูมิในตัวแม่พิมพ์จะลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจาก ตัวแม่พิมพ์ไปสู่อากาศ เมื่อถึงเวลาที่ 300 วินาทีกระบวนการบ่มจะสิ้นสุดนั้นอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์ จะลดลงดังแสดงในภาพที่ 128(6) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมินั้นจะค่อยๆลดลงเนื่องจากการถ่ายเท ความร้อนให้กับอากาศ ซึ่งกรณีดังกล่าวหากเป็นแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวนเบ้ามาก อาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงานได้เนื่องจากผลของความแตกต่างด้าน อุณหภูมิในแต่ละส่วน



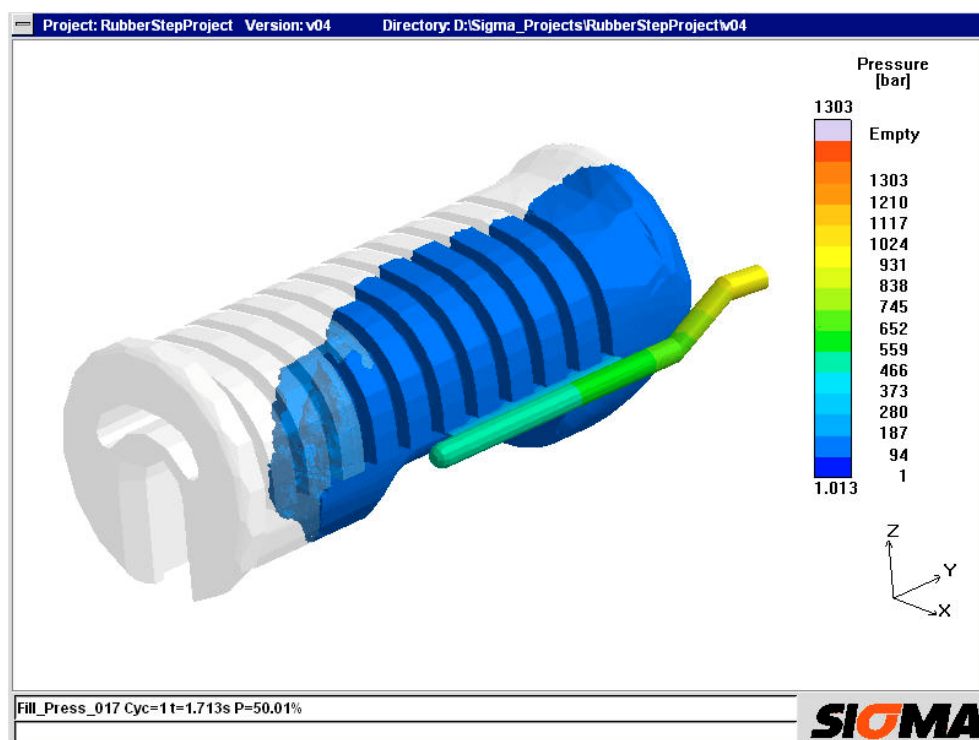
ภาพที่ 128 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะอบยาง โดยแสดงทุก ๆ 1 นาที

10. แรงดันฉีด (injection pressure)

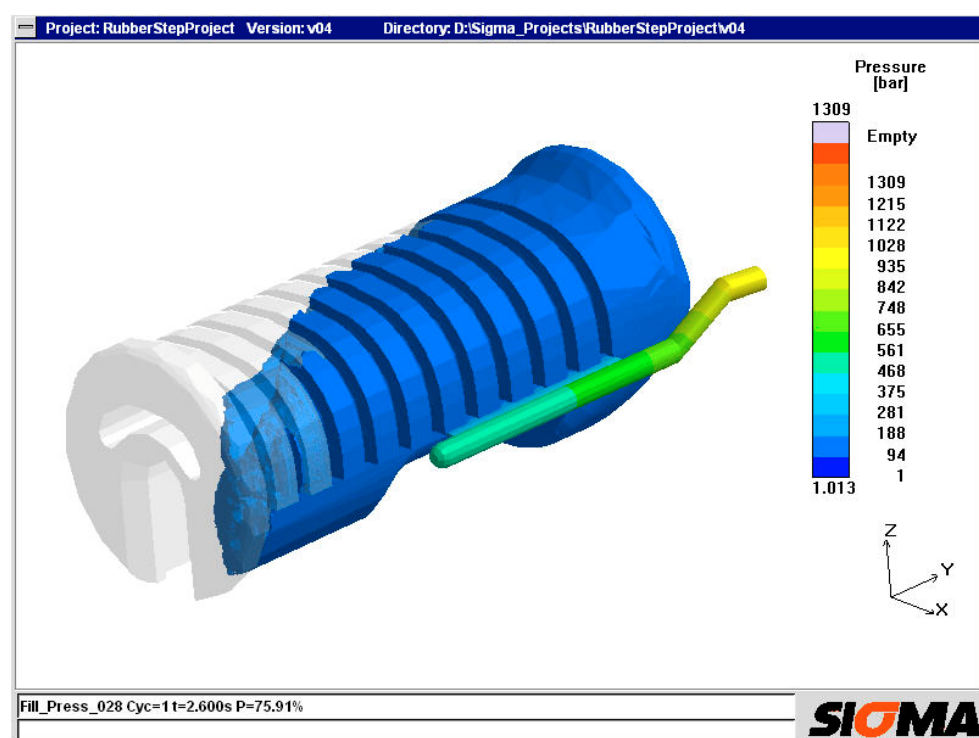
แรงดันฉีดที่เกิดขึ้นขณะทำการฉีดแสดงในภาพที่ 129 ถึงภาพที่ 132 ในภาพที่ 129 จะเป็นความดันที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของการฉีด จะเห็นได้ว่าความดันภายในเบ้าขึ้นงานจะเท่ากับ ความดันบรรยากาศคือ 1.013 บาร์ เนื่องจากภายในเบ้าแม่พิมพ์นั้นไม่มีแรงดันด้านการไหลของ ผิวหน้าของยางที่ไหลเข้าไป แต่จะเห็นได้ว่าแรงดันในรูเข้าและทางวิ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุด 1300 บาร์ที่บริเวณรูจ่าย (inlet) ในภาพที่ 130 ถึงภาพที่ 132 จะเป็นความดันที่ 50 , 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของการฉีดซึ่งผลของความดันฉีดมีค่าที่เท่ากับที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ 1.013 บาร์ ซึ่งความดัน ที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ นั้นจะเกิดที่บริเวณรูจ่ายของเนื้อยาง จะมี ค่าที่ 1,300, 1,303, 1,309 และ 1,329 บาร์ ตามลำดับ ผลของแรงดันที่ได้จากโปรแกรมนี้ สามารถนำไปช่วยในการตรวจขนาดของเครื่องฉีดได้ว่าเครื่องฉีดมีแรงดันฉีดสูงสุดเพียงพอหรือไม่ ใช้ในการเลือกชนิดของเหล็กที่จะนำมาทำแม่พิมพ์ได้ รวมทั้งจำนวนเบ้าและความยาวของ ทางวิ่งว่าใช้แรงดันมากกว่าแรงดันสูงสุดของเครื่องฉีดหรือไม่



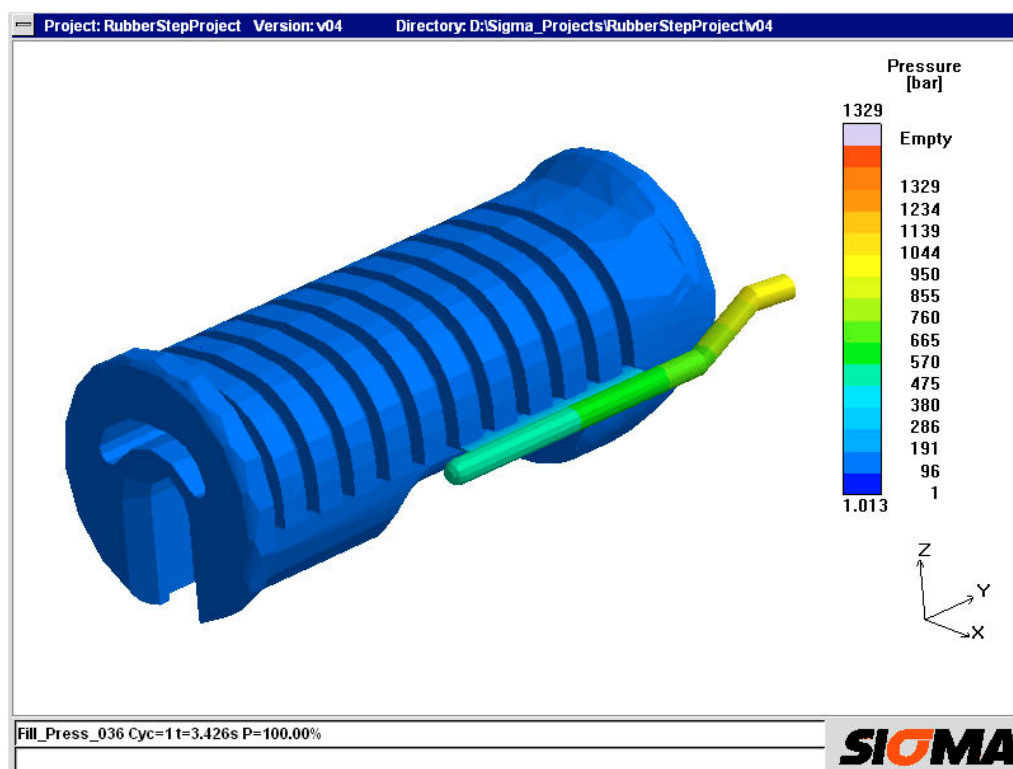
ภาพที่ 129 แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 25% ของการฉีด



ภาพที่ 130 แสดงผลของแรงดันนืดที่ 50% ของการนืด



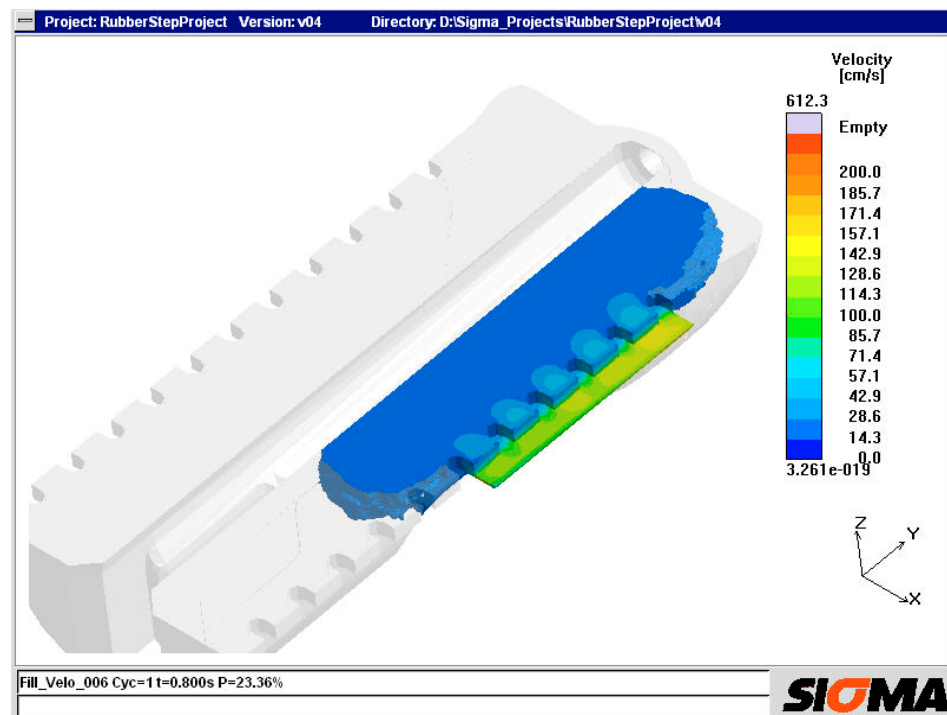
ภาพที่ 131 แสดงผลของแรงดันนืดที่ 75% ของการนืด



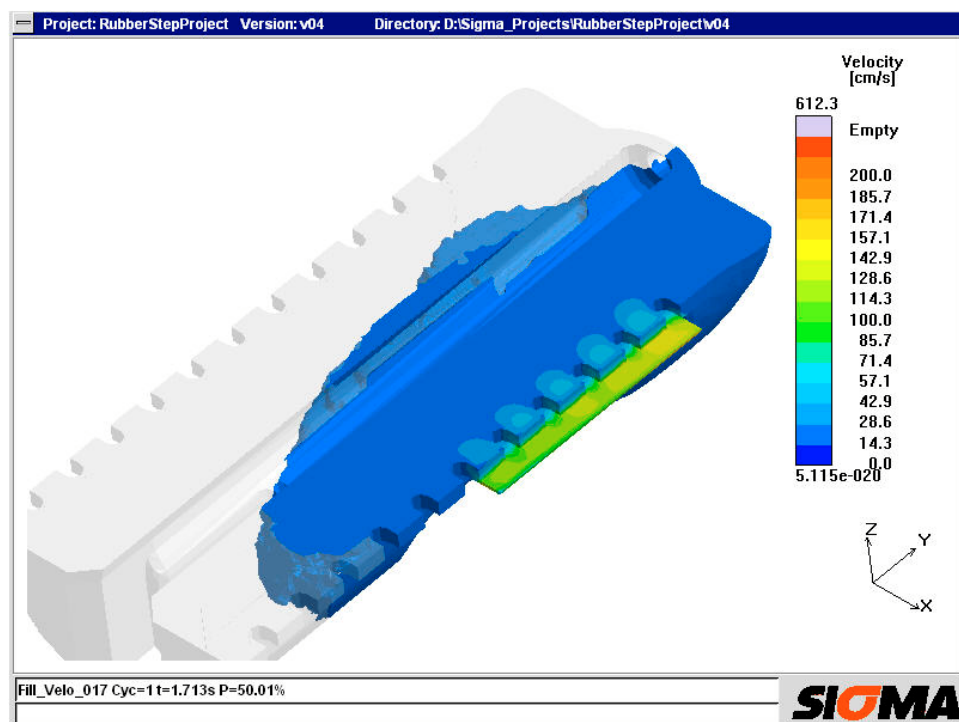
ภาพที่ 132 แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 100% ของการฉีด

11. ความเร็วฉีด (injection velocity)

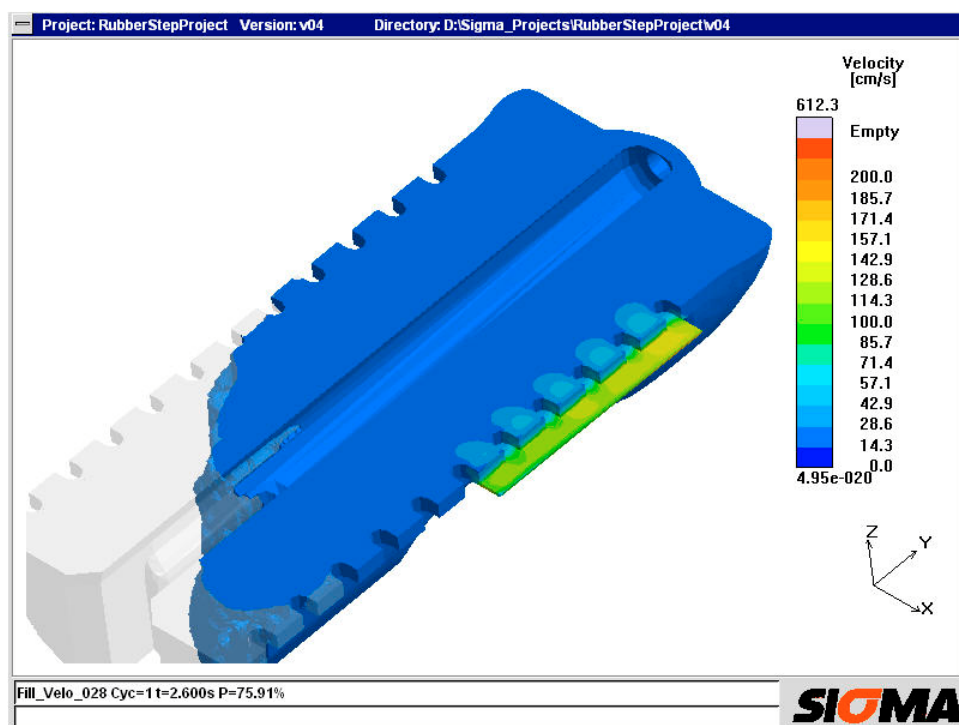
ความเร็วของการฉีดยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์นั้นจะแสดงไว้ในภาพที่ 133 ถึงภาพที่ 136 ในภาพที่ 133 นั้นเป็นความเร็วของยางที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของการฉีดซึ่งความเร็วที่เกิดขึ้นภายในช่องทางวิ่งนั้นจะมีค่าสูงและเมื่อเข้าสู่รูเข้าก็จะมีความเร็วที่สูงเช่นกัน ซึ่งความเร็วสูงสุดเกิดที่บริเวณกึ่งกลางของรูเข้ามีความเร็วที่ 612.3 เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อยางไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์แล้วความเร็วจะลดลงเหลือ 10 -50 เซนติเมตรต่อวินาที และในภาพที่ 134 ถึง 136 จะแสดงความเร็วของยางที่ 50, 75, และ 100 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วของยางที่ไหลเข้ามีค่าที่เหมือนกับที่ 25 เปอร์เซ็นต์ หากความเร็วของยางสูงเกินไปอาจจะทำให้เกิด Jetting ได้ และหากความเร็วฉีดต่ำเกินไปก็อาจส่งผลให้เนื้อยางเกิดการสุกก่อนหรือไหม้ได้ (over cure)



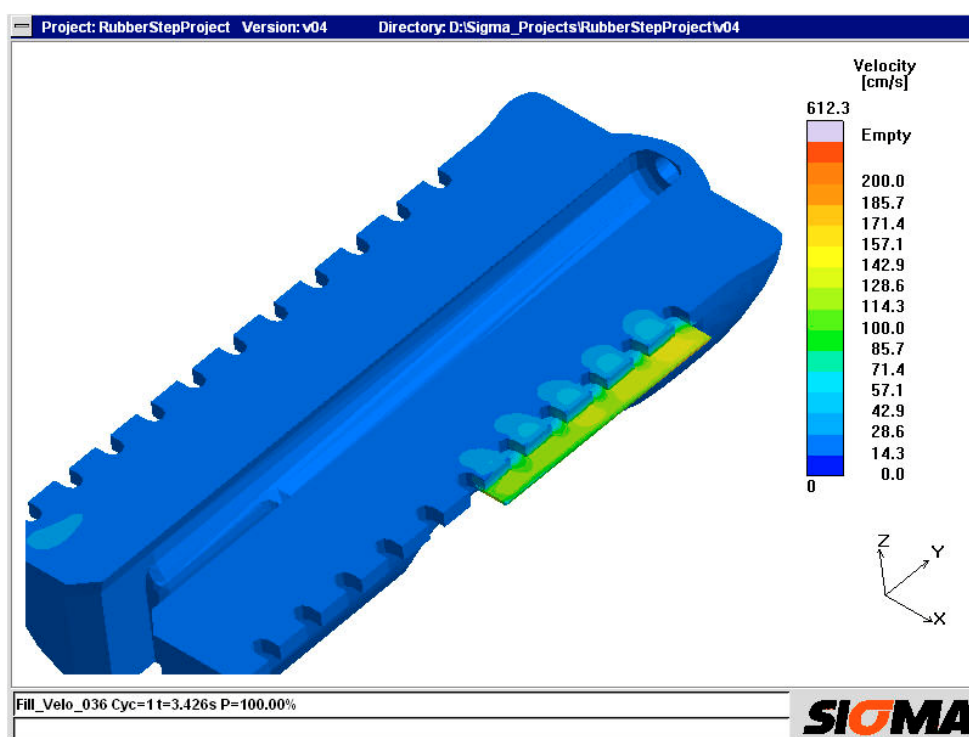
ภาพที่ 133 แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 25% ของการฉีด



ภาพที่ 134 แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 50% ของการฉีด

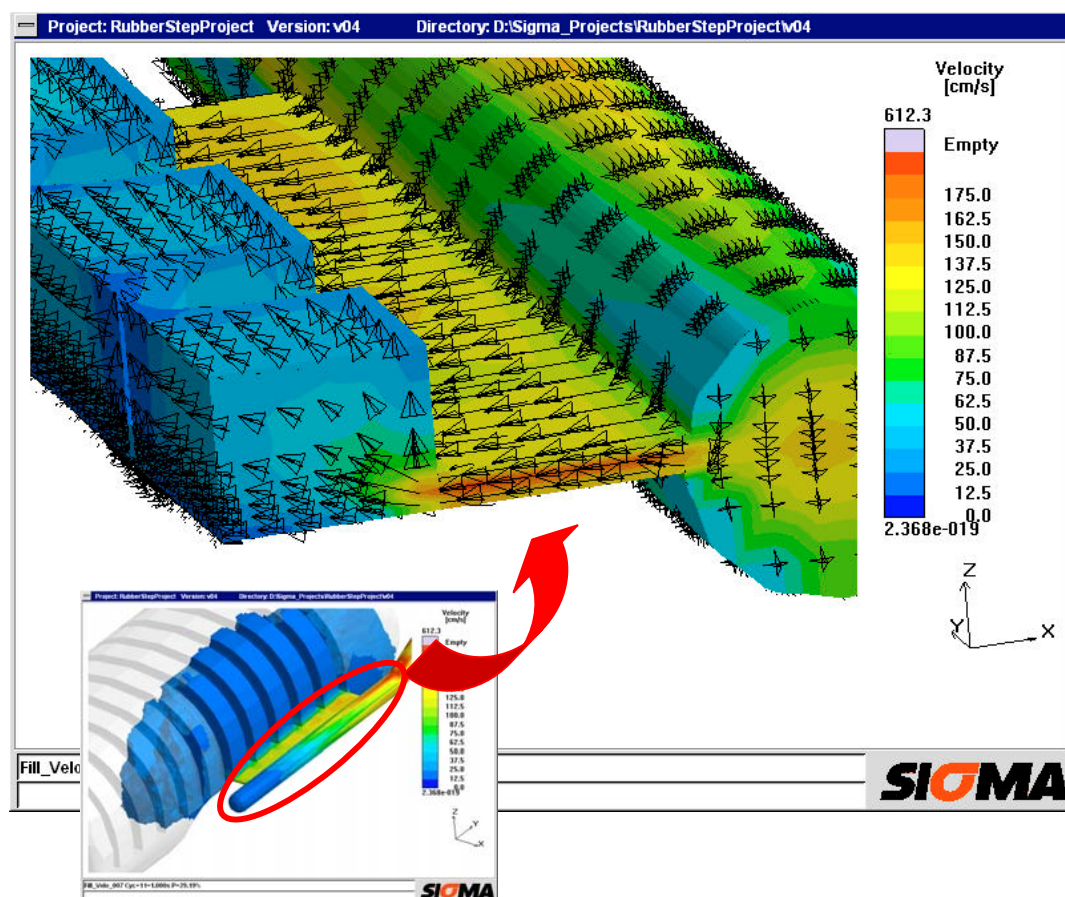


ภาพที่ 135 แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 75% ของการฉีด



ภาพที่ 136 แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 100% ของการฉีด

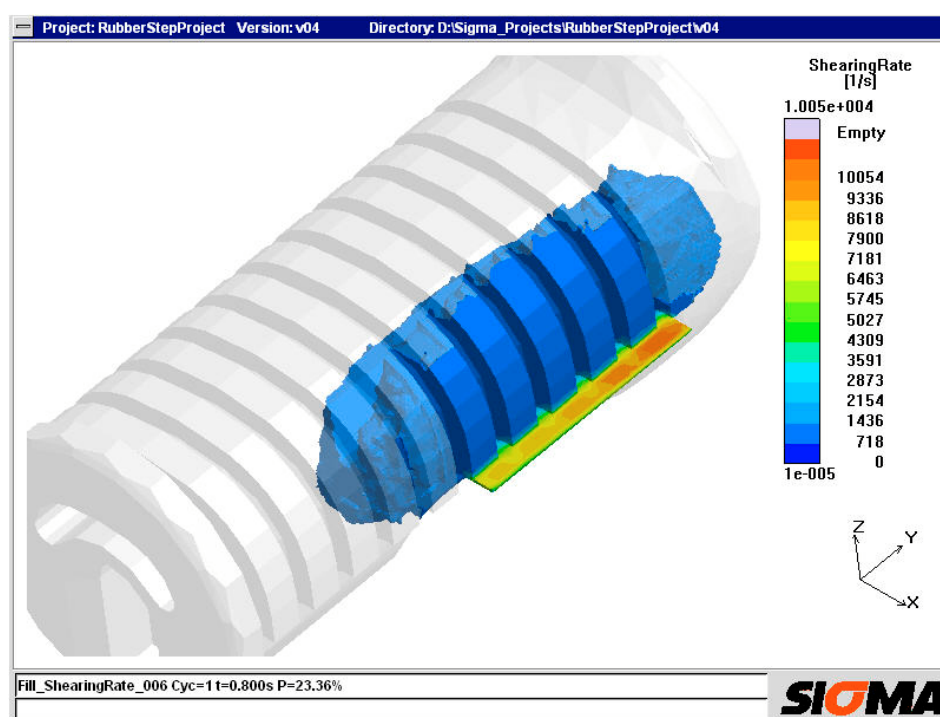
ในภาพที่ 137 แสดงทิศทางการไหลของยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ โดยลูกศรจะแสดงถึงทิศทางการไหลของยางเข้าไปภายในแม่พิมพ์จะเห็นได้ว่าเมื่อยางไหลออกจากรูเข้าแล้ว ทิศทางการไหลของยางจะกระจายออกทุกทิศทาง จากรูปจะเห็นได้ว่าความเร็วของเนื้อยางที่รู้เข้าของแม่พิมพ์นั้นจะค่อย ๆ ลดลง



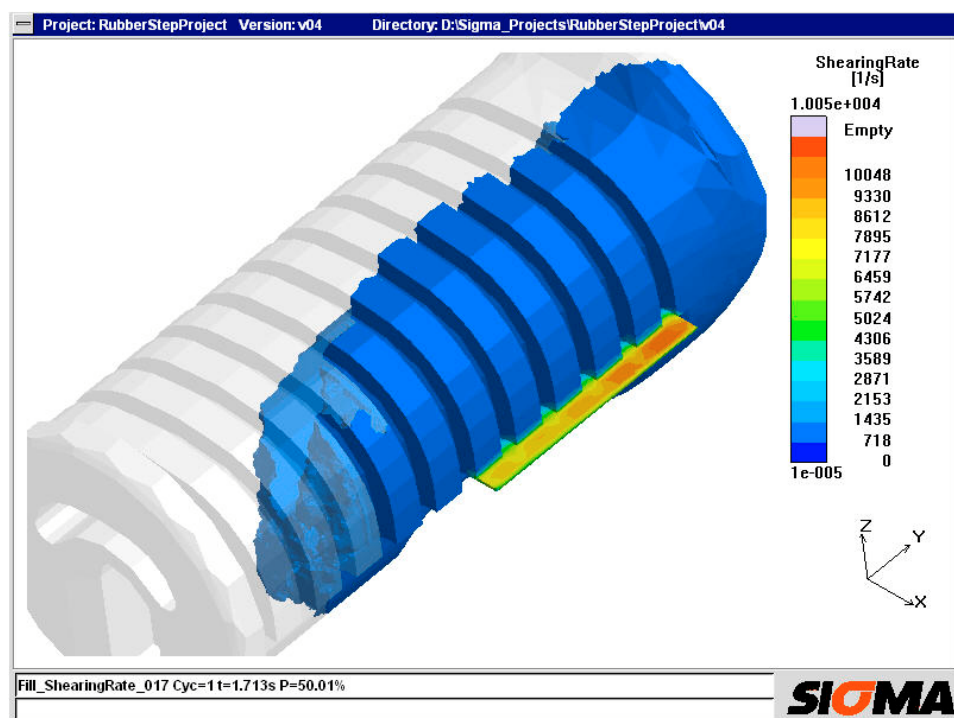
ภาพที่ 137 แสดงเส้นทางการไหลของยางขณะฉีด

12. อัตราการเฉือน (shearing rate)

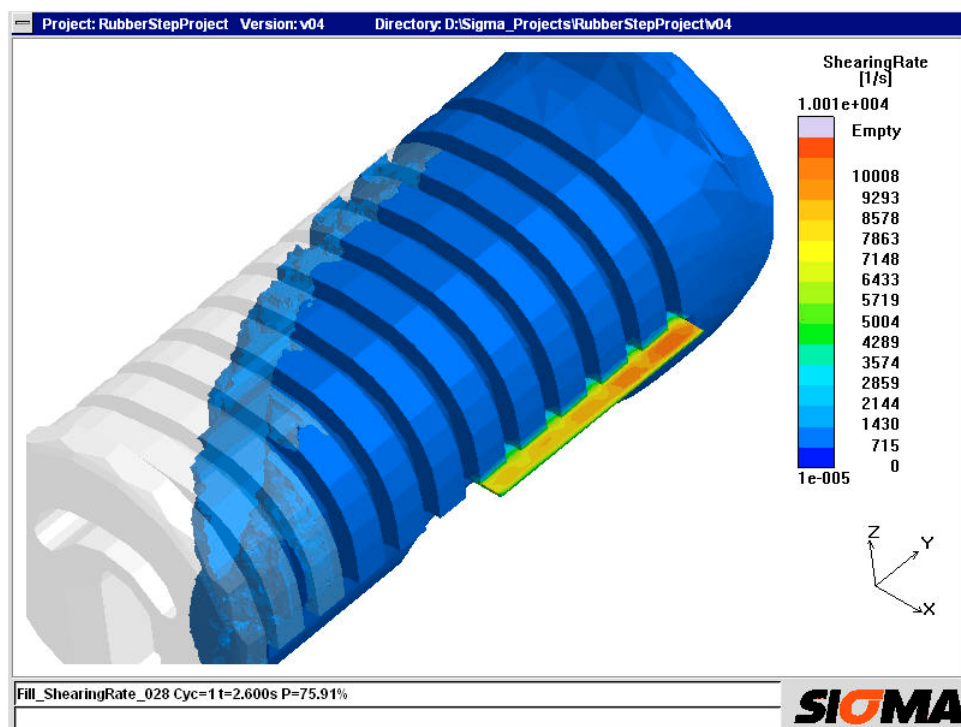
อัตราการเฉือนคืออัตราการเปลี่ยนแปลงรูปของเนื้อยางที่เกิดขึ้นขณะฉีดนั้นแสดงในภาพที่ 138 ถึงภาพที่ 141 ในภาพที่ 138 จะแสดงอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นภายในยางที่ 25 เปอร์เซ็นต์เซ็นต์ของการฉีด จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูงบริเวณช่องทางวิ่ง และรูเข้า เนื่องจากมีขนาดที่เล็กทำให้การไหลเกิดอัตราการเฉือนได้มากซึ่งมีค่าสูงสุดที่บริเวณรูเข้าที่ 10,054 (1/วินาที) และในภาพที่ 139 ถึง 141 จะแสดงอัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นภายในยางตอนฉีดที่ 50, 75, และ 100 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นภายในยางตอนฉีดมีค่าที่เหมือนกับที่ 25 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเฉือนจะมีผลให้อุณหภูมิของยางสูงมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปการฉีดยางต้องการให้อุณหภูมิของยางสูงจึงมีการออกแบบให้รูเข้ามีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เนื้อยาง



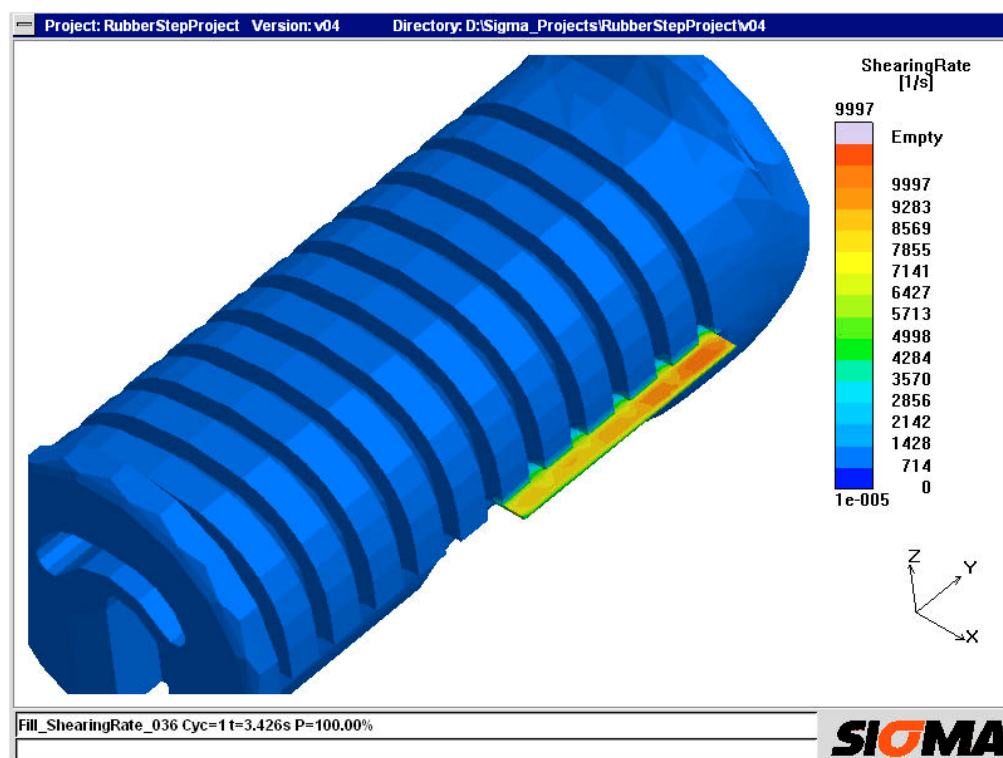
ภาพที่ 138 แสดงผลของอัตราความเค้นเฉือนที่ 25% ของการฉีด



ภาพที่ 139 แสดงผลของอัตราความเค้นเฉือนที่ 50% ของการฉีด



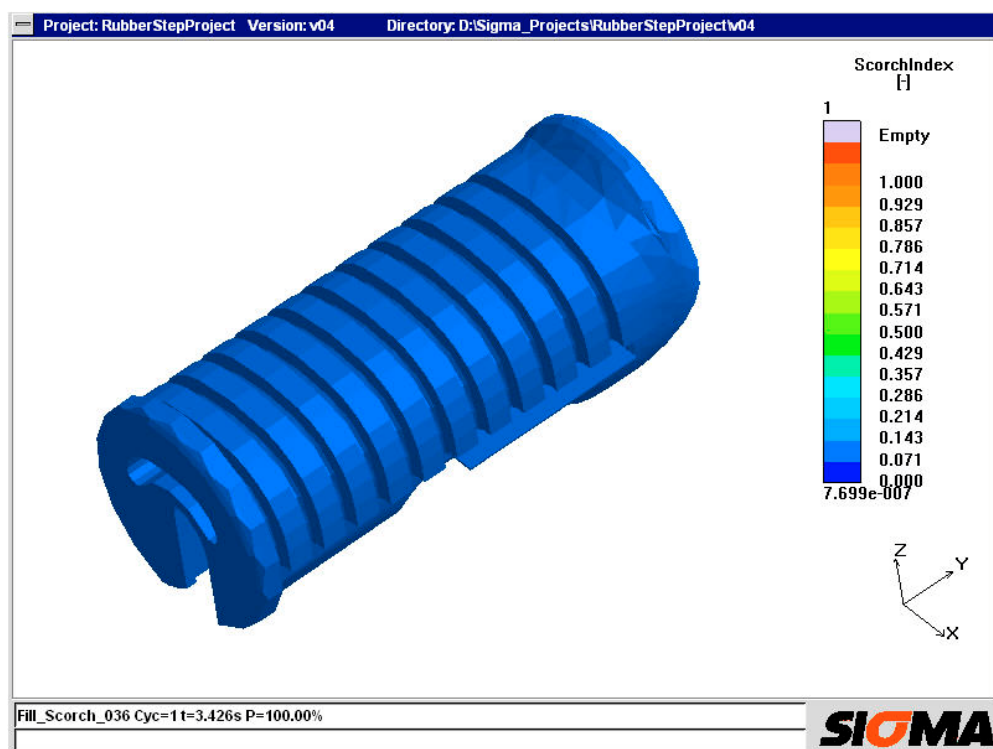
ภาพที่ 140 แสดงผลของอัตราความเค้นเฉือนที่ 75% ของการฉีด



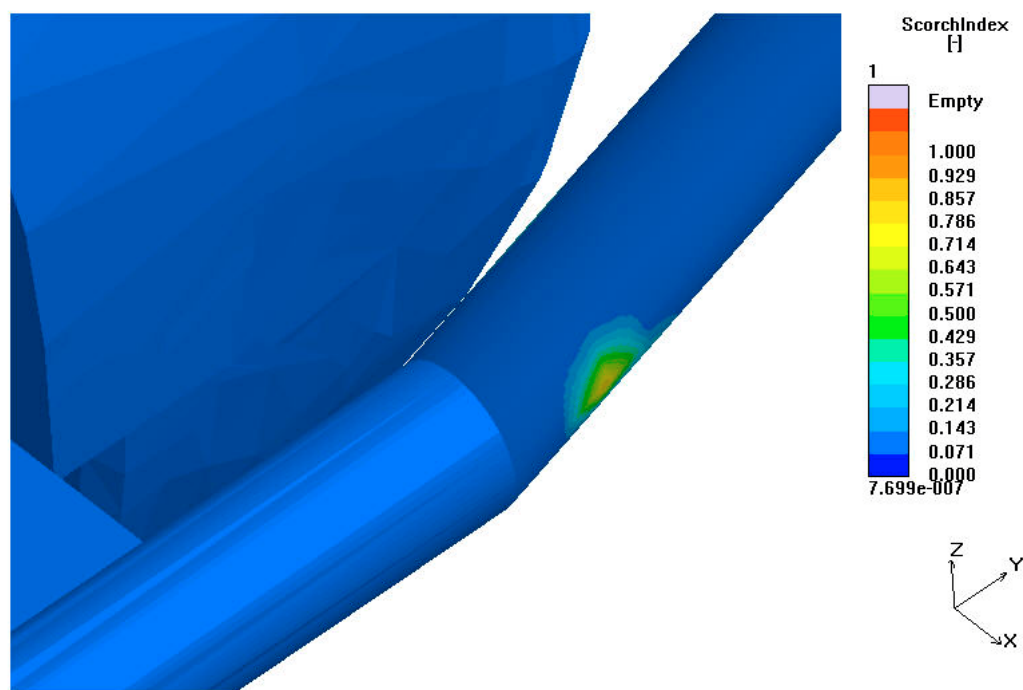
ภาพที่ 141 แสดงผลของอัตราความเค้นเฉือนที่ 100% ของการฉีด

13. การเปลี่ยนแปลงของเนื้อยางหลังการฉีดเต็ม (scorch index)

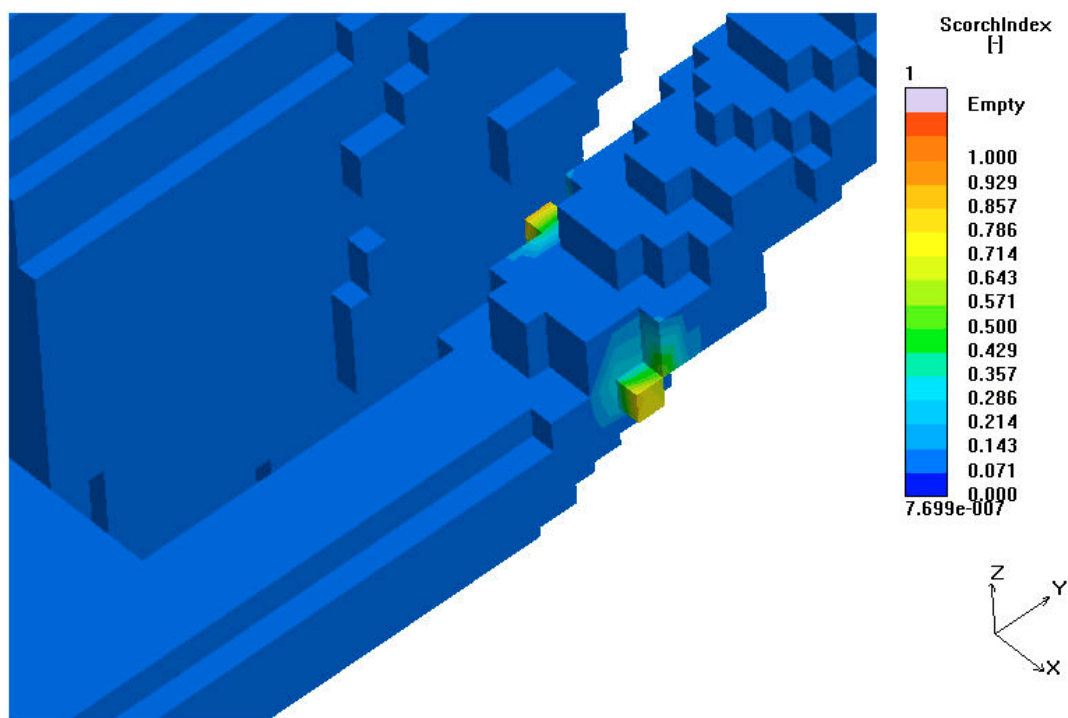
ค่า Scorch Index ของโปรแกรม 3D-SIGMA หมายถึงค่าการเริ่มปฏิกิริยา โดยหากค่า Scorch Index มีค่าเท่ากับ 1 ที่บริเวณนั้นจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา ในภาพที่ 142 แสดงชิ้นงานที่เสร็จสิ้นกระบวนการฉีดเนื้อยางจะอยู่ภายในแม่พิมพ์จนเต็ม จะเห็นได้ว่าเนื้อยางเป็นสีน้ำเงินคือมีดัชนีการสุกตัวของยางที่ค่าศูนย์ หมายความว่าชิ้นงานไม่มีบริเวณใดที่เริ่มการเกิดปฏิกิริยาก่อน อย่างไรก็ตามเมื่อดูจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าดัชนีสูงสุดคือ 1 ซึ่งบริเวณที่มีค่าดังกล่าวอยู่ที่บริเวณทางวิ่งดังภาพที่ 143 เมื่อพิจารณาแล้วบริเวณดังกล่าวไม่น่าเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูป จึงได้ทำการปรับภาพเป็นแบบเอลิเมนต์ดังภาพที่ 144 พบว่าจุดดังกล่าวที่มีค่าดัชนีเป็น 1 นั้นเกิดจากการวางตัวของเอลิเมนต์ที่ไม่สมบูรณ์คือมีลักษณะการวางต่อกันแบบขอบชนกัน (edge-edge) เพียงอย่างเดียว ทำให้การวิเคราะห์โปรแกรมในส่วนนี้ผิดพลาดตัวได้ อย่างไรก็ตามในจุดดังกล่าวไม่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์จึงสามารถยอมรับได้ ในภาพที่ 145 แสดงลักษณะการวางเอลิเมนต์แบบขอบชนกัน



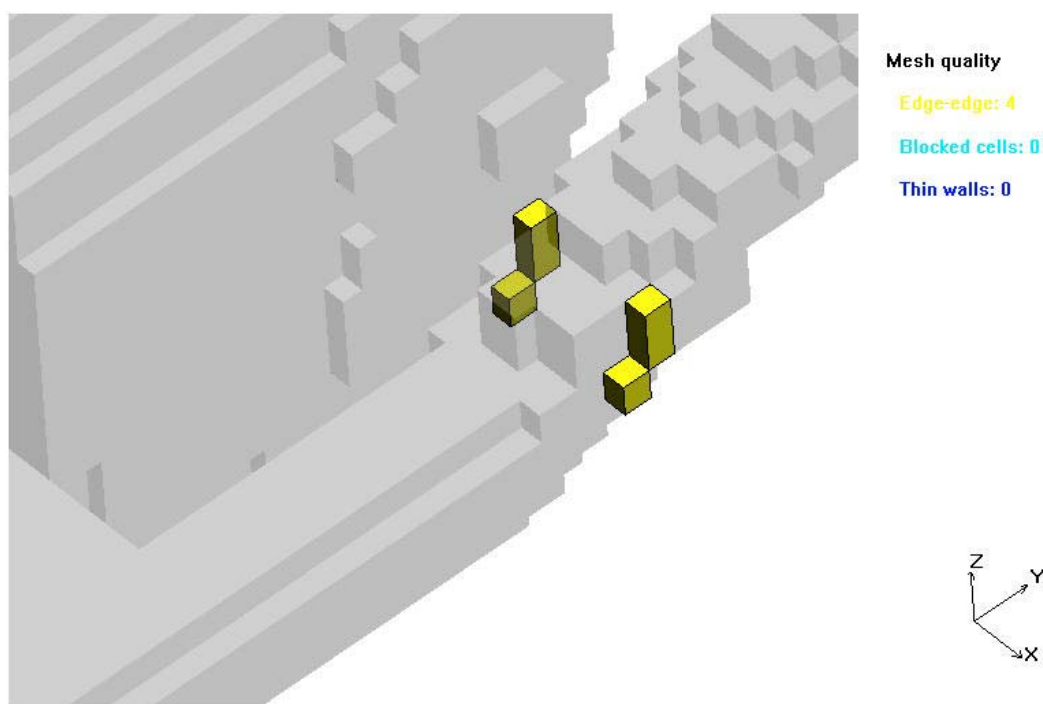
ภาพที่ 142 แสดงผลของเนื้อยางที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาหลังจากฉีดเต็ม



ภาพที่ 143 แสดงบริเวณที่เนื้อยางจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน



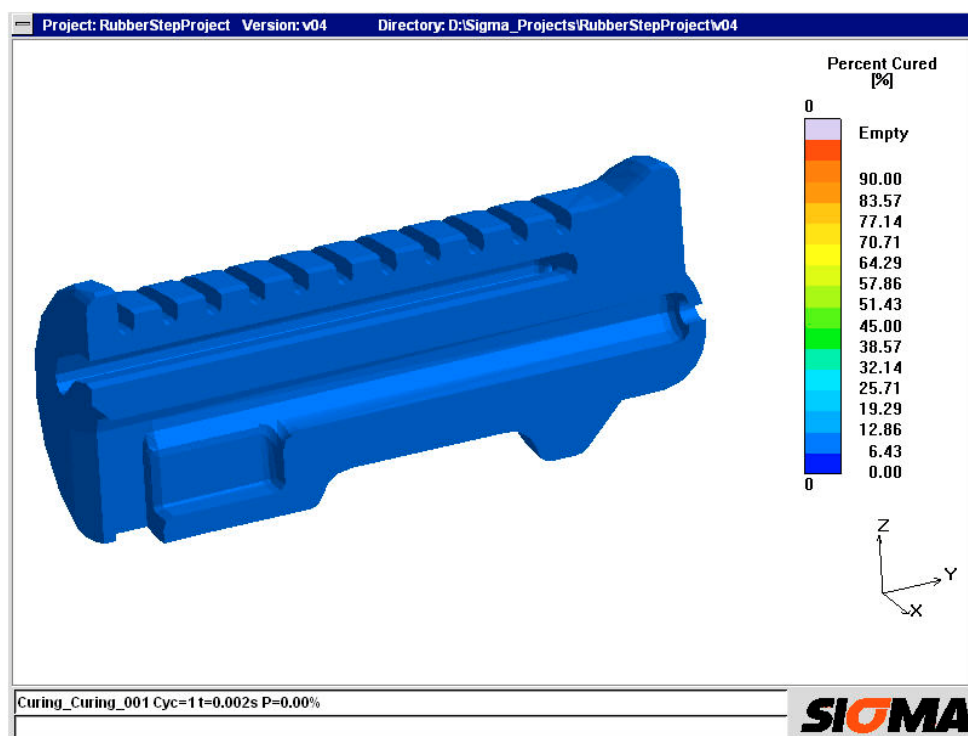
ภาพที่ 144 แสดงบริเวณที่เนื้อยางจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน โดยแสดงเป็นลักษณะแบบเอลิเมนต์



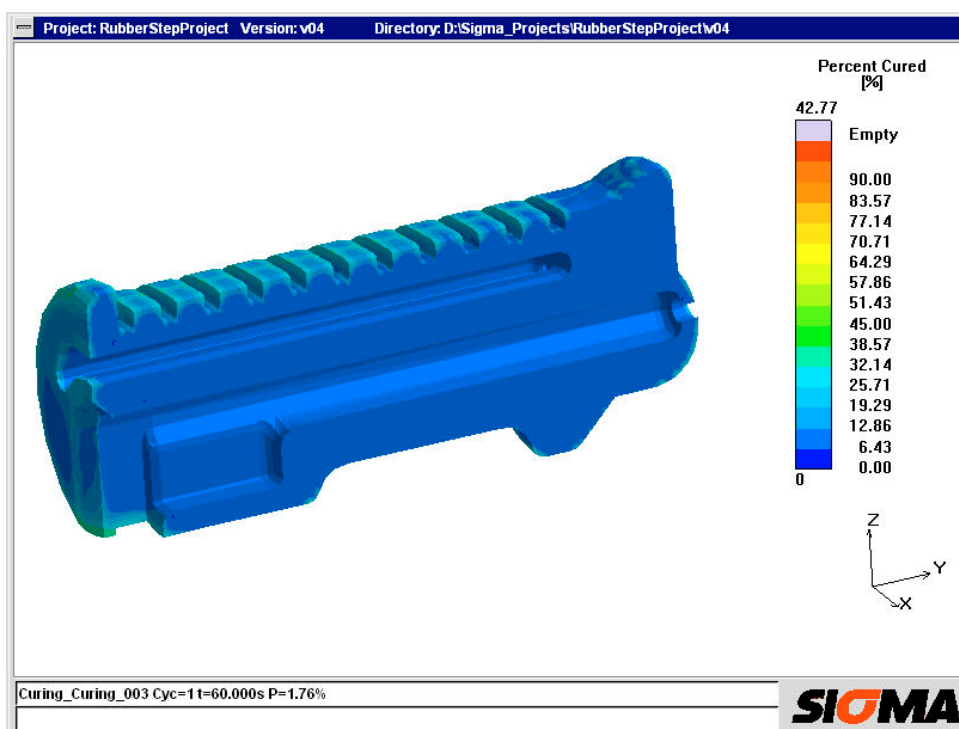
ภาพที่ 145 แสดงบริเวณที่เนื้อยางจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน เนื่องจากการแบ่งเอลิเมนต์

14. การสุกของเนื้อมายภายในชิ้นงาน (curing rate)

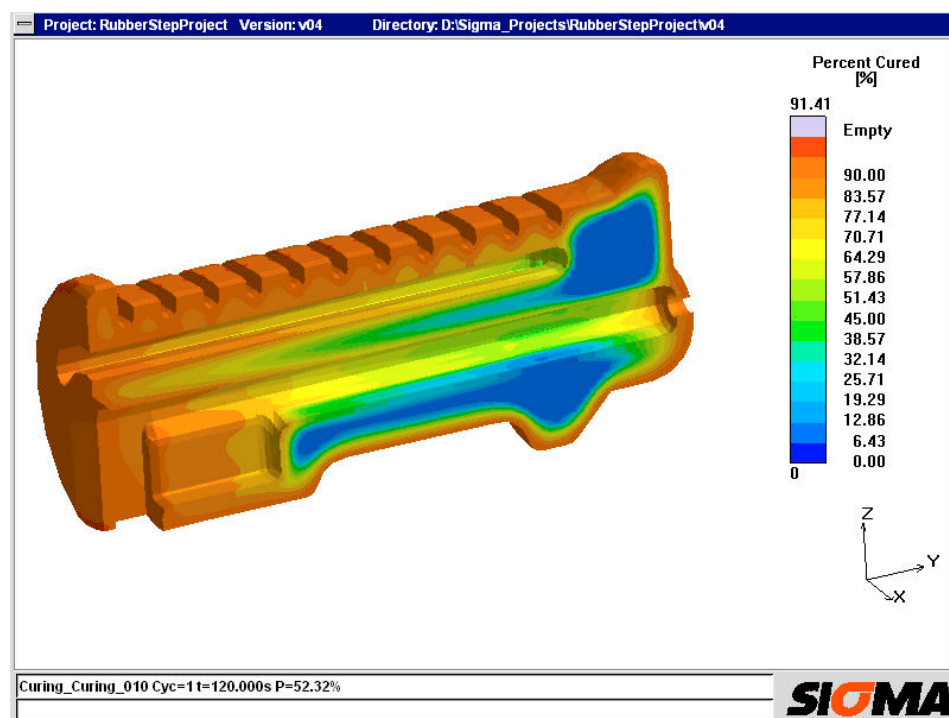
การสุกตัวของชิ้นงานนั้นในการฉีดจริงบ่อยครั้งที่พบว่าภายในชิ้นงานจะมีโอกาสที่ชิ้นงานสุกไม่เต็มที่ได้ เนื่องจากความร้อนกระจายตัวจากภายนอกสู่ภายในได้ยาก โปรแกรม 3D-SIGMA เป็นโปรแกรมแบบ 3 มิติ จึงช่วยให้สามารถดูการสุกภายในชิ้นงานได้ ดังภาพที่ 146 แสดงชิ้นงานที่เวลาเริ่มต้นการบ่ม เมื่อผ่าครึ่งชิ้นงานจากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าภายในของชิ้นงานนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของการสุกตัวจะมีค่าที่เท่ากันที่ศูนย์อยู่ และเมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาทีนั้นเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อมายนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้น โดยแสดงในภาพที่ 147 จะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ 42.77 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเนื้อมายได้รับความร้อนจากแม่พิมพ์ แต่บริเวณภายในของชิ้นงานและส่วนที่สัมผัสกับชุดสโกลด์นั้นเนื้อมายจะยังไม่สุกตัว และเมื่อเวลาที่ 120 วินาทีนั้นเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อมายนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นโดยแสดงในภาพที่ 148 จะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณผิวของชิ้นงานที่ 91.41 เปอร์เซ็นต์ และภายในของชิ้นงานจะเริ่มสุกตัวเช่นกันแต่ก็ยังมีส่วนที่ยังไม่สุกตัวอยู่ และที่เวลา 180 วินาที การสุกตัวของชิ้นงานสูงสุดที่ 96.83 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 149 ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณผิวและภายในของชิ้นงานก็จะเริ่มที่จะสุกตัว โดยที่ค่าน้อยที่สุดจะอยู่ที่ 34.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณภายในของด้านหัวของชิ้นงานและบริเวณแกนกลาง และในภาพที่ 150 แสดงการสุกตัวที่เวลา 240 การสุกตัวของชิ้นงานสูงสุดที่ 98.38 เปอร์เซ็นต์ ในภาพที่ 151 แสดงการสุกตัวที่เวลา 240 การสุกตัวของชิ้นงานสูงสุดที่ 98.99 เปอร์เซ็นต์ ในการทำการทดลองจริงนั้นอุณหภูมิของชุดสโกลด์นั้นจะน้อยกว่าในการใช้โปรแกรม เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนขณะที่นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจึงทำให้ อาจเกิดการไม่สุกตัวของเนื้อมายที่บริเวณที่ติดกับชุดสโกลด์ซึ่งจะทำให้เนื้อมายติดกับชุดสโกลด์



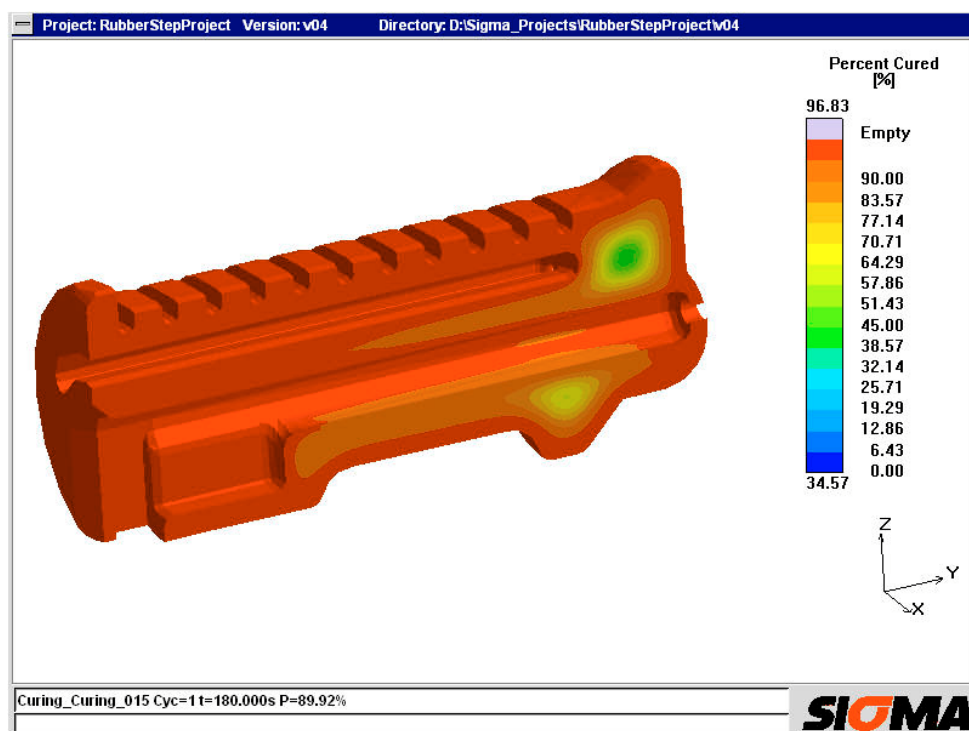
ภาพที่ 146 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลาเริ่มต้น



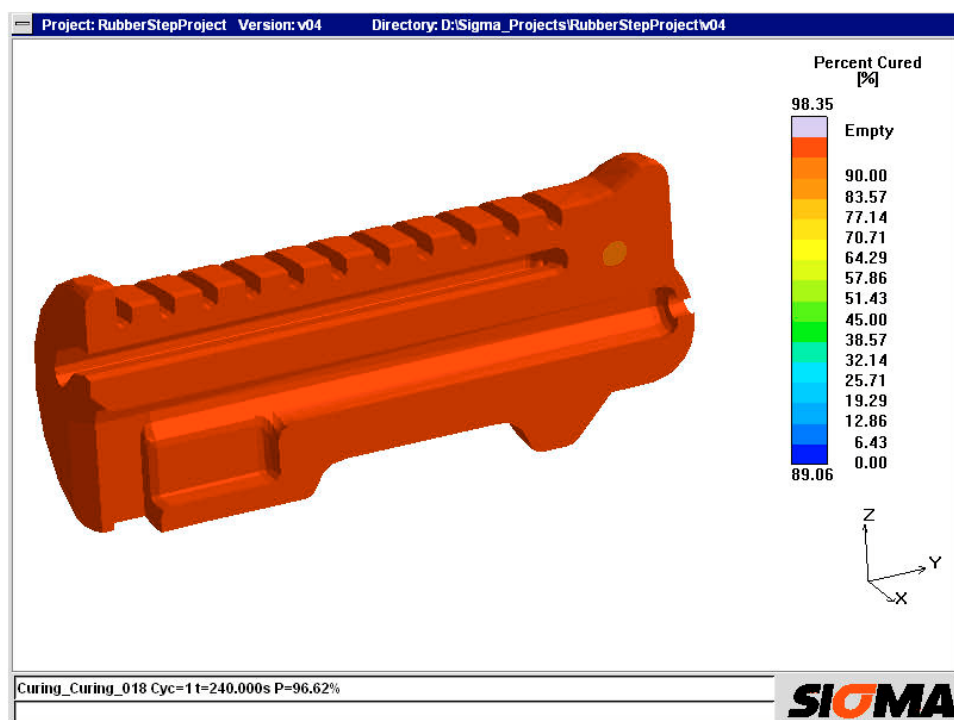
ภาพที่ 147 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลา 60 วินาที



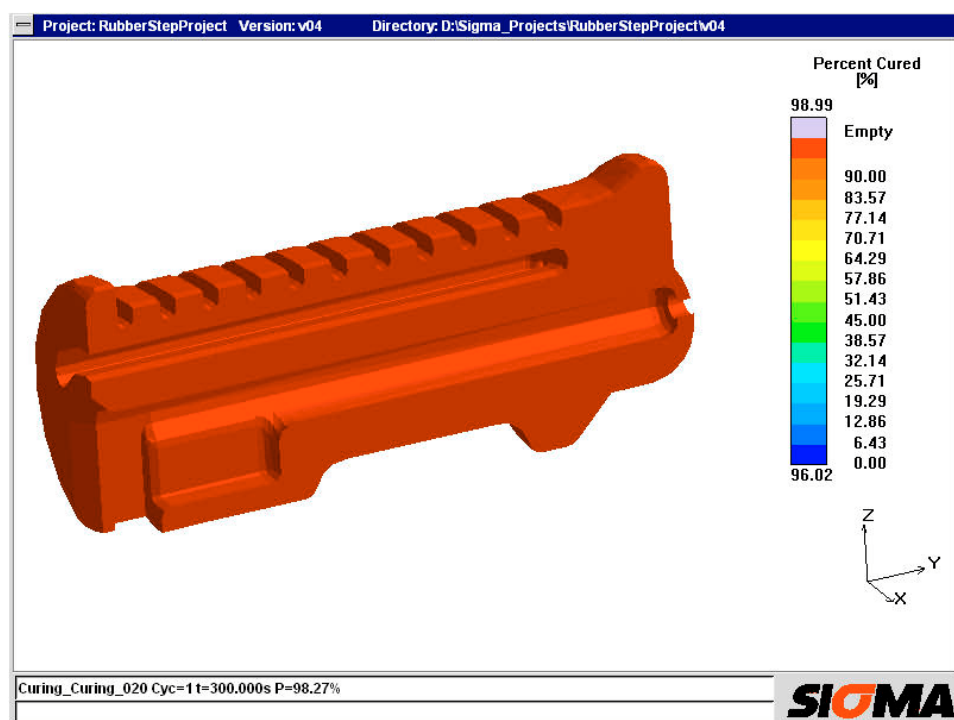
ภาพที่ 148 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลา 120 วินาที



ภาพที่ 149 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลา 180 วินาที

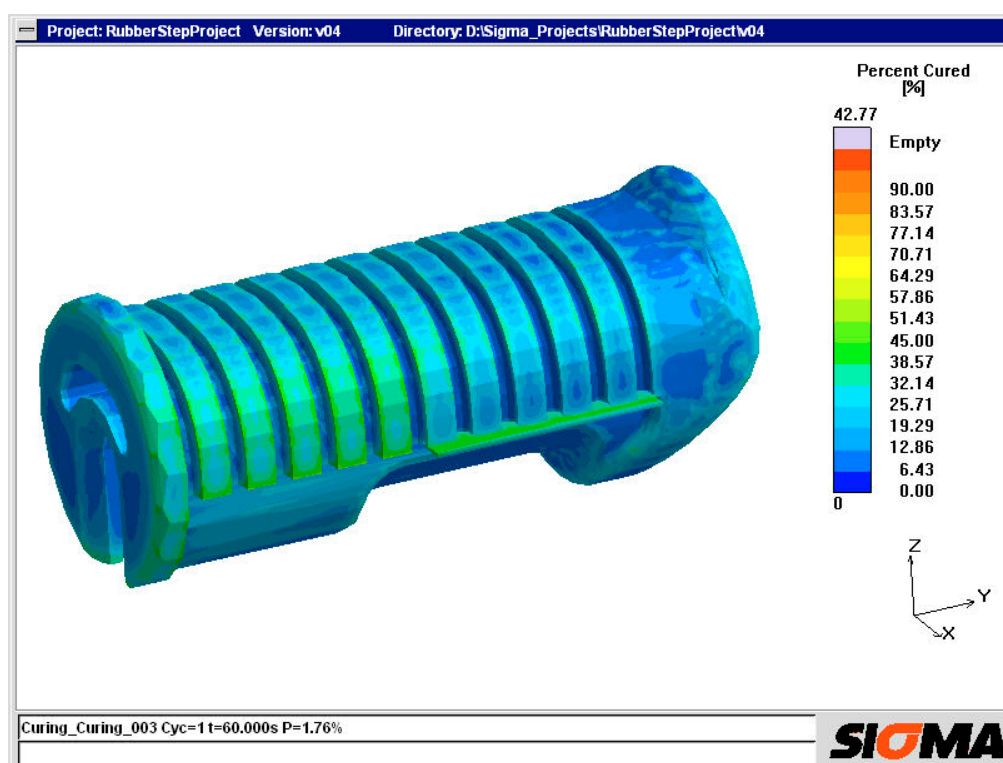


ภาพที่ 150 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลา 240 วินาที

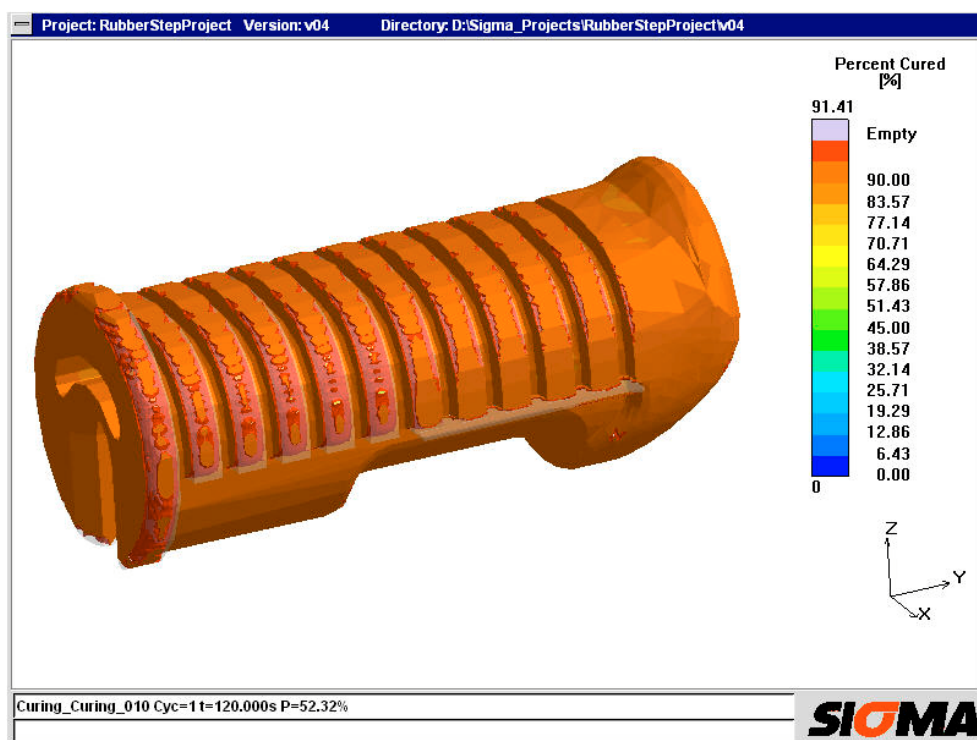


ภาพที่ 151 แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อยางภายในชิ้นงาน ที่เวลา 300 วินาที

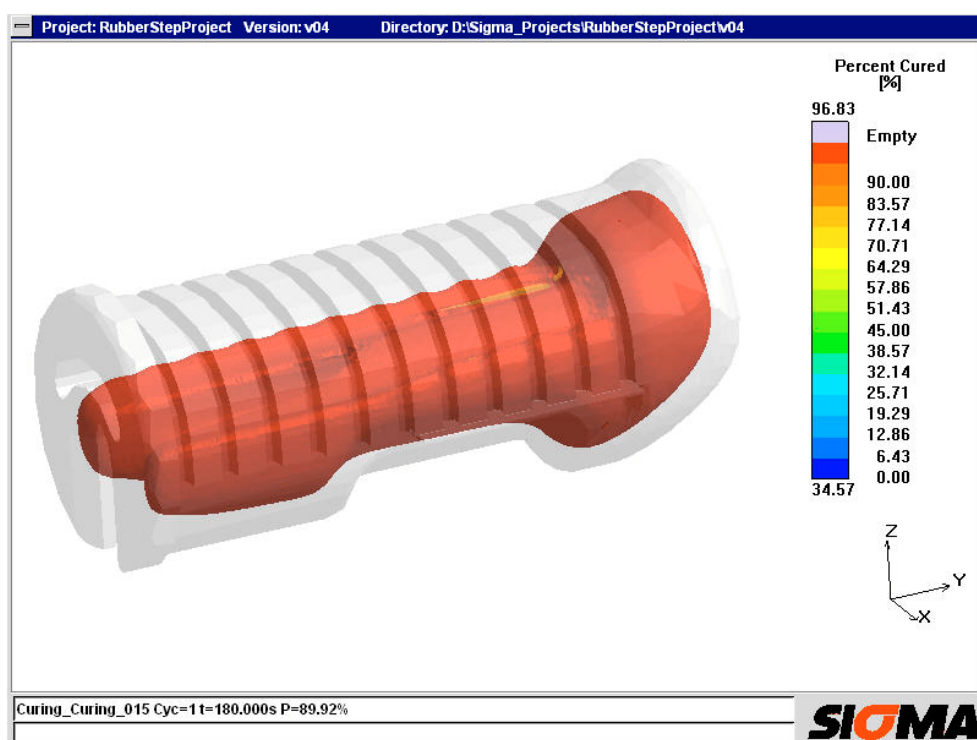
โปรแกรม 3D-SIGMA สามารถแสดงเฉพาะส่วนที่ต้องการได้เช่นในรูปที่ 152 ถึง 155 จะแสดงเฉพาะบริเวณที่การสุกตัวของเนื้อมยางไม่ถึง 90 เปอร์เซนต์ ที่เวลา 60 วินาที ของชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดทั่วบริเวณของชิ้นงานเนื่องจากจะต้องใช้เวลาในการบ่มเนื้อมยางให้นานกว่านี้ และเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 120 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 153 ชิ้นงานจะเริ่มสุกตัวมากกว่า 90 เปอร์เซนต์ ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน เมื่อเวลาที่ 180 วินาทีการสุกตัวของเนื้อมยางจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 154 ซึ่งเหลือส่วนที่สุกไม่ถึง 90 เปอร์เซนต์ จะอยู่ที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงาน ที่เกิดที่เมื่อเวลาที่ 240 วินาทีการสุกตัวของเนื้อมยางจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 155 ซึ่งเหลือส่วนที่สุกไม่ถึง 90 เปอร์เซนต์ จะอยู่ที่บริเวณด้านปลายของชิ้นงาน



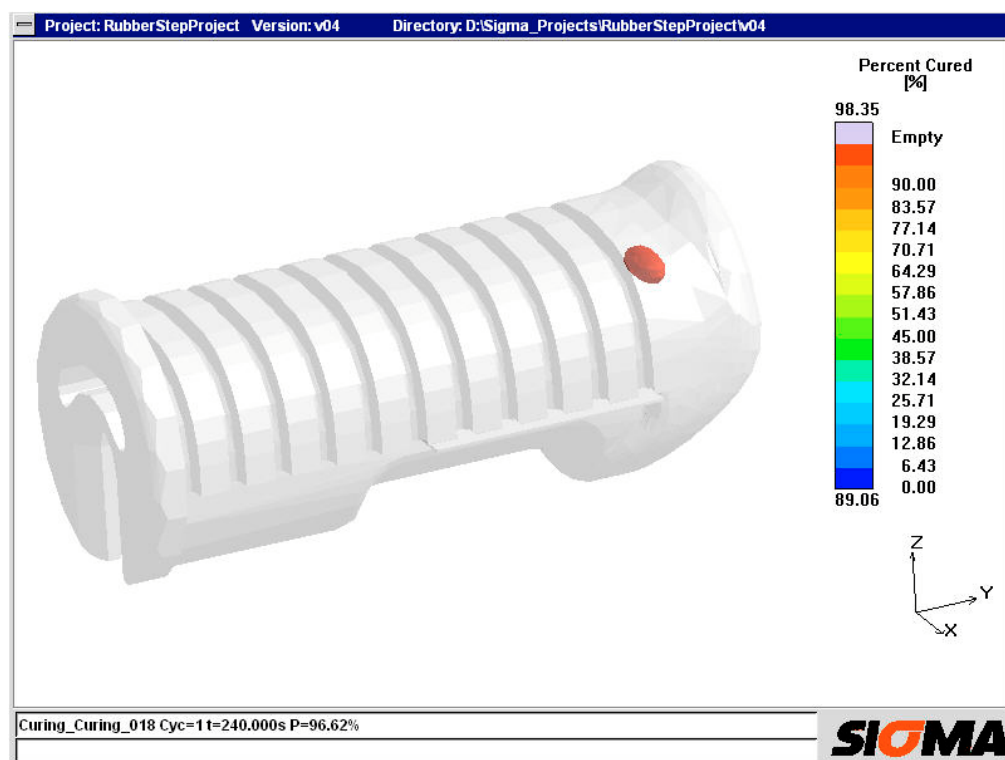
ภาพที่ 152 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซนต์ ที่เวลา 60 วินาที



ภาพที่ 153 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 120 วินาที



ภาพที่ 154 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 180 วินาที



ภาพที่ 155 แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 วินาที