

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการคิดขั้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....55680
วัน,เดือน,ปี 24 พ.ค. 2548

b.....
i.....

STUDY OF PROCESSING PARAMETERS AND DEVELOPMENT OF
SIMULATION MODEL OF POLYURETHANE FOAM IN REACTION
INJECTION MOLDING



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการจัดชั้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

โดย

นายณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์

นายปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ

นางสาวมาลิน มุ่งมาตร

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ร่วม

ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์

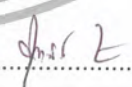
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬ.

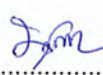
ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

.....กรรมการ
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

.....กรรมการ
(อ.สุธาสินี เนรมิตตพงษ์)

.....กรรมการ
(อ.บุญชัย ไชติวิริยวานิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการจัดชั้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

โดย

นายณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์

นายปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ

นางสาวมาลิน มุ่งมาตร

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ร่วม

ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ปริญญาานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการปรับลดขยะพอลิยูรีเทนโฟมจากกระบวนการจัดชั้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ ด้วยการมุ่งเน้นพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจ ในปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม, ลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟมและสมบัติการไหลของโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส ในการทดลองได้ทำการจัดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์โปร่งใส ที่ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิพื้นผิวในช่วง 30, 55 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ (Flow visualizations) จากนั้นทำการวัดค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้อรวมทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อโฟม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy : SEM) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานต่างๆ ในลักษณะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับลดเศษโฟมจากรูล้นในแม่พิมพ์ต่อไป จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการจัดพอลิยูรีเทนโฟม คณะผู้วิจัยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและระยะทางการไหลของโฟมในแม่พิมพ์ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่สามารถใช้ทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมได้

Report Title Study of Processing Parameter and Development of Simulation
Model of Polyurethane foam in Reaction Injection Molding

By Mr. Narong Jittapanyapong
Mr. Piyawat Supphasrirongjaroen
Miss Malin Mungmart

Thesis Advisor Dr. Surat Areerat

Thesis Co-advisor Dr. Apinan Namkanisorn

Report for Bachelor's Degree of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This research presents a primary study aiming to reduce the waste of polyurethane foam from the molding process of steering wheels. It focuses on the development and understanding of the basic factors relating to the polymerization reaction, morphology and the flow visualizations of polyurethane foam in the transparent mold.

In this experiment, polyurethane foam was injected into a transparent mold which has various surface temperatures of 30, 55 and 80 °C, and the flow visualization during foam formation was studied. The density of polyurethane foam was measured and the internal structure was investigated by a scanning electron microscopy (SEM). The relationship among basic factors was demonstrated in a simulation model which predicts the cell growth rate of polyurethane foam. This information was then incorporated into the optimization of the condition for foam injection so that the waste due to an excess amount of foam poring out of the mold can be reduced.

The result obtained from this study allows us to formulate the relationship between temperature, time and distant flow of polyurethane foam in the mold, leading to the development of a primary mathematical model which can be used to predict the characteristic of foam products.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.อภิรักษ์ นัมคณิสสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ และดูแลเอาใจใส่การทำงานของคณะผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้งให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการ อุตสาหกรรม สำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปี 2546 ผู้ให้เงินสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณวรินทร์ ฤกษ์ขวี กรรมการผู้จัดการ และเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายของบริษัท ซัมมิทสเตย์ริงวีล จำกัด สำหรับการให้ความสนับสนุนและอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ต่างๆ ในการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้ความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ คณะผู้วิจัยขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

นายณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์

นายปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ

นางสาวมาลิน มุ่งมาตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 โฟม (Foam).....	6
2.2.1 การแบ่งประเภทของโฟม.....	6
2.2.2 การผลิตโฟม.....	7
2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation).....	9
2.3.1 การเกิดโฟม.....	9
2.3.2 การหาจำนวนของฟองก๊าซในเนื้อโฟม.....	9
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics model).....	11
2.5 พอลิยูรีเทน (Polyurethane).....	14
2.5.1 ชนิดของพอลิยูรีเทน.....	15
2.5.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน.....	22
2.5.4 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟม.....	24
2.6 Reaction Injection Molding Process (RIM).....	25
2.6.1 ขั้นตอนการทำงาน.....	26
2.6.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ RIM.....	28
2.7 กระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์.....	29
บทที่ 3 การทดลอง.....	32
3.1 สารเคมี.....	32
3.2 วัสดุและอุปกรณ์.....	32
3.3 การทดลอง.....	33
3.3.1 การออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์.....	33
3.3.2 การกำหนดค่าต่างๆ ของเครื่องฉีดพอลิยูรีเทนโฟม.....	34
3.3.3 วิธีการทดลอง.....	35
3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของโฟม.....	36
4.2 ผลการศึกษาค่าอุณหภูมิต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม.....	37
4.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	37
4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะการไหลของโฟมและการเกิดโฟม.....	38
4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเนื้อโฟม.....	41
4.2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนาแน่นของเนื้อโฟม.....	44
4.2.5 การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
5.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นกับเวลา; $n_{CO_2}(t)$	47
5.2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา; $T(t)$	47
5.3 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับเวลา; $P(t)$	51
5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก ก นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	60
ภาคผนวก ข การหาความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม โดยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเล็กทรอนิกส์.....	61
ภาคผนวก ค การหาปริมาตรของโฟม โดยอาศัยวิธีการอินทิกรัลสามชั้นในระบบพิกัดฉาก.....	62
ภาคผนวก ง การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม.....	63
ภาคผนวก จ ผลการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมพอลิแมท.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทน.....	17
2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน.....	18
2.3 ลักษณะการใช้งานของ MDI ที่ค่าฟังก์ชันนอลิตีในช่วง 2.0-3.0.....	20
2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง.....	21
2.5 วัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ.....	22
2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานระหว่างกระบวนการ RIM กับ TIM.....	26
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 ข้อมูลของกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์.....	34
4.1 ระยะเวลาไหลของโฟม ณ จุดที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด.....	41
4.2 ผลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อขนาดของฟองก๊าซที่ระยะเวลาไหลต่างๆ ของโฟม.....	43
5.1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมจากผลการทดลองจัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	46
5.2 ความสัมพันธ์ของสมการพหุนามระหว่างอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา ณ ช่วงระยะเวลาไหลต่างๆ ของโฟม.....	48
5.3 ความสัมพันธ์ของสมการพหุนามระหว่างค่าคงที่กับระยะเวลาไหลของโฟม ณ สภาวะการทดลองต่างๆ.....	50
5.4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งที่อัตราการขยายตัวสูงสุด มีค่าสูงสุด.....	51
5.5 ความดันภายในของฟองก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
ง-1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟม.....	63
จ-1 ผลการคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา..... พอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน	65
จ-2 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ..... โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส	68
จ-3 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ..... โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ-4 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิกายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	74
โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส	
จ-5 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	77
โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส	
จ-6 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	80
โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส	
จ-7 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	83
โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส	
จ-8 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ :.....	87
สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส	
จ-9 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ :.....	91
สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส	
จ-10 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ :.....	95
สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองของฟองก๊าซ (Cell growth model).....	5
2.2 โครงสร้างภายในของโฟม.....	7
2.3 แบบจำลองของฟองก๊าซที่ใช้ในการคำนวณ.....	12
2.4 การเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน.....	14
2.5 คุณสมบัติการใช้งานของพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ.....	16
2.6 โครงสร้างโมเลกุลของโพลูอีนาไดไฮโซไซยานต.....	19
2.7 โครงสร้างโมเลกุลของไดฟีนิลเมเทนไดไฮโซไซยานต.....	19
2.8 แผนภาพกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยใช้วิธี Reaction injection molding.....	27
2.9 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ RIM และหลักการการทำงานของหัวผสม.....	27
2.10 ปริมาณการผลิตรถยนต์นั่ง, รถบรรทุกและรถยนต์บิกอล์ฟในแต่ละปี.....	30
2.11 แผนภาพของกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์.....	31
3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง.....	33
4.1 การไหลของโฟมและแบบจำลองในการหาปริมาณในช่วงต่างๆ.....	36
4.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ระยะเวลาการไหลต่างๆ ของโฟม ระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน.....	37
4.3 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพอลิยูรีเทนโฟม..... ณ ช่วงเวลาต่างๆ	39
4.4 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อระยะเวลาของการไหลของพอลิยูรีเทนโฟม..... ณ ช่วงเวลาต่างๆ	39
4.5 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่ออัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม..... ณ ช่วงเวลาต่างๆ	40
4.6 SEM micrographsของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะเวลาการไหลต่างๆ ของโฟม..... ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส	41
4.7 SEM micrographsของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะเวลาการไหลต่างๆ ของโฟม..... ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 SEM micrographsของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะการไหลต่างๆ ของโฟม.....	42
ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส	
4.9 SEM micrographs ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งระยะการไหล 0 เซนติเมตร.....	43
ที่สภาวะการทดลองต่างๆ	
4.10 SEM micrographsของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งระยะการไหล 20 เซนติเมตร.....	43
ที่สภาวะการทดลองต่างๆ	
4.11 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ.....	44
ณ ระยะของการไหลต่างๆ ของโฟม	
4.12 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม.....	45
ณ ระยะของการไหลต่างๆ ของโฟม	
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์กับจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้น.....	44
5.1 จำนวนโมลของก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ.....	47
5.2 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับระยะการไหลของโฟม.....	49
5.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันภายในฟองก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับอุณหภูมิต่างๆ ของพื้นผิวแม่พิมพ์.....	53
5.5 การเปรียบเทียบปริมาตรของฟองก๊าซที่ทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลอง.....	54
5.6 การเปรียบเทียบปริมาตรของผลิตภัณฑ์โฟมที่ทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลอง...	55
ข-1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอเลคทรอนิกส์.....	61
ค-1 รูปทรงสี่เหลี่ยมในระบบพิกัดฉาก.....	62
จ-1 ลักษณะการใช้งานโปรแกรมพอลิแมท.....	97

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

จากแผนการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ พบว่าการพัฒนาของอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญ ที่ช่วยทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพทางการแข่งขันในตลาดโลก ดังเห็นได้จากนโยบายของรัฐบาลในการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ ในประเทศ โดยมุ่งเน้นให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในย่านเอเชีย หรือที่มีคำกล่าวไว้ว่า ประเทศไทยจะเป็นดีทรอยต์ตะวันออก เนื่องจากลักษณะการแข่งขันอย่างรุนแรงในปัจจุบัน ทางภาครัฐได้ให้ความสำคัญต่อผู้ประกอบการในระดับเอสเอ็มอี (SME) ที่ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในประเทศเป็นอย่างมาก เพื่อสนับสนุนให้มีศักยภาพด้านการแข่งขันและสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำได้ทั้งทางด้านต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การมีส่วนช่วยพัฒนาและให้การสนับสนุนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ต่างๆ ในประเทศ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยอาศัยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) มีบทบาทอย่างมาก เพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนประกอบของยานยนต์ เช่น พวงมาลัย, ฝ้าจับเกียร์, แผงคอนโซล, อุปกรณ์ตกแต่งภายนอกและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ ในห้องโดยสาร เป็นต้น ซึ่งผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะนำเข้าเทคโนโลยีการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมและวัตถุดิบจากต่างประเทศ และสำหรับผู้ประกอบการในระดับเอสเอ็มอี ยังต้องการพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้เป็นอย่างมาก เพื่อช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์และการปรับลดของเสียจากงานฉีดขึ้นรูป รวมทั้งการลดเศษขยะโฟมที่เกิดขึ้น ดังนั้นการทําวิจัยร่วมระหว่างภาคการศึกษาและผู้ประกอบการ จะมีส่วนช่วยพัฒนาความรู้ด้านงานฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมได้เป็นอย่างดี

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้รับจากการเข้าร่วมโครงการฝึกงานเทคโนโลยีสะอาดระหว่างนักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) กับทางบริษัท ชัมมิต สเตยริง วีล จำกัด [1] ซึ่งเป็นผู้ประกอบการประเภทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในระดับเอสเอ็มอี โดยทำการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนและหัวเกียร์พลาสติกสำหรับโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศ มีกำลังการผลิตประมาณ 180,000 วงต่อปี จากการตรวจประเมินในเบื้องต้น พบว่ากระบวนการขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ ทำได้โดยฉีดพอลิยูรีเทนโฟมใส่แม่พิมพ์ ลักษณะโดยทั่วไปของแม่พิมพ์นั้น จำเป็นต้องมีรูสันเพื่อช่วยไล่อากาศภายในแม่พิมพ์ออก ซึ่งใน

ชั้นตอนนี้ ทำให้เกิดเศษโคมที่เป็นของเสียจากรูลิ้นเป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณเศษโคมเสียประมาณ 12 ตันต่อปี ส่งผลให้ทางโรงงานต้องมีภาระต้นทุนของวัตถุดิบที่เสียไปในส่วนนี้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี อีกทั้งเศษโคมที่เกิดจากกระบวนการข้างต้นดังกล่าว ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเศษโคมพอลิยูรีเทนจัดเป็นขยะอุตสาหกรรมที่เป็นพิษชนิดหนึ่ง ดังนั้นทางโรงงานต้องเสียค่าใช้จ่าย เพื่อจ้างบริษัทกำจัดขยะอุตสาหกรรมดำเนินการ

ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโคม แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะสำคัญ คือ งานฉีดที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ทำให้เกิดรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์และการฉีดเนื้อโคมมากเกินไปจนล้นแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเศษโคมจากรูลิ้นของแม่พิมพ์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากทางโรงงานเป็นผู้ประกอบการในระดับเอสเอ็มอีที่ยังต้องการการพัฒนาเทคโนโลยีด้านงานฉีดพอลิยูรีเทนโคม ดังนั้น แนวทางแก้ไขในปัจจุบันทางโรงงานใช้วิธีทดลองปรับลดปริมาณสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียวเพื่อควบคุมปริมาณเศษโคมที่เกิดขึ้นจากรูลิ้น ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณเศษโคมได้จำนวนหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามแนวทางที่สำคัญเพื่อช่วยลดขยะพอลิยูรีเทนโคม ต้องการความเข้าใจปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโคม

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการนำเสนอวิธีการลดขยะพอลิยูรีเทนโคม ด้วยการมุ่งเน้นการพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจในปัจจัยพื้นฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโคม, ลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโคม และสมบัติการไหลของพอลิยูรีเทนโคมในแม่พิมพ์ โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโคมลงในแม่พิมพ์โปร่งใส ซึ่งออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ได้ เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโคมในแม่พิมพ์ นำพอลิยูรีเทน โคมที่ผลิตได้มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ขนาดรูพรุนและร้อยละการขยายตัวในแม่พิมพ์ จากนั้น คณะผู้วิจัยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานกับลักษณะสัณฐานวิทยาของโคม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับลดเศษโคมจากรูลิ้นในแม่พิมพ์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโคม โดยมุ่งเน้นถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวของโคม, ลักษณะการไหลของโคมในแม่พิมพ์และลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโคมที่ผลิตได้ โดยคาดว่าจะสามารถนำผลการศึกษามาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในงานฉีดพอลิยูรีเทนโคม

1.2.2 เพื่อศึกษานาแนวทางปรับแก้ไขงานฉีดโคมที่เหมาะสม โดยมุ่งหวังให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด

1.2.3 เพื่อหาแนวทางที่ได้พัฒนาขึ้นในการช่วยลดเศษของเสียจากรูลิ้นของแม่พิมพ์ โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.3.2 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทน โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ที่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส, ลักษณะการไหลของโฟม, ลักษณะสันฐานวิทยาและสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟม เช่น รั้อยละของการขยายตัวของโฟมในแม่พิมพ์และความหนาแน่นของเนื้อโฟม เป็นต้น โดยเน้นนำผลการศึกษามาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในงานจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมและนำความเข้าใจในปัจจัยหลักมาปรับแก้ไขงานฉีดโฟม

1.3.3 ทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในสายการผลิต พร้อมทั้งทำการปรับแก้ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่องานฉีดโฟม โดยมุ่งเน้นการปรับลดของเสียจากรูล้นและเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในแบบจำลองที่สร้างขึ้น

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน, กระบวนการจัดขึ้นรูปและกลไกการเกิดโฟม

1.4.2 ออกแบบแม่พิมพ์ชนิดโปร่งใส เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟม (Foam Visualization Study)

1.4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานกับคุณสมบัติของโฟมที่ผลิตได้

1.4.4 พัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการทำนายคุณลักษณะการไหลและสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟม

1.4.5 ทดลองทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในสายการผลิต พร้อมการปรับแก้ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่องานฉีดโฟม

1.4.6 สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ความเข้าใจพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อช่วยสนับสนุนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานตรงตามที่โรงงานกำหนด

1.5.2 สามารถพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมทั่วไป

1.5.3 สามารถลดเศษโฟมจากรูล้นในกระบวนการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

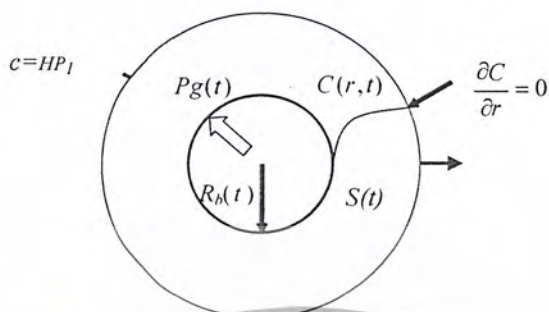
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการกลไกเกิดพอลิเมอร์โฟมนั้น ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน ดังจะเห็นได้จากผลงานทางวิชาการต่างๆ ที่มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างมากมาย ในส่วนนี้เสนองานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟมและกลไกการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างการไหลภายในแม่พิมพ์ โดยพัฒนาแบบจำลองจากสมการเคมีพื้นฐาน เพื่อใช้แสดงผลการทำนายขนาดของรูพรุนและอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม ดังนี้

Chang Dae Han และคณะ [2] ได้แสดงผลงานวิจัยทั้งเชิงทฤษฎีและการทดลอง เพื่อศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกโฟมลงในแม่พิมพ์ และใช้อธิบายกลไกการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างการไหลของพลาสติกเหลวภายในแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยแผ่นกระจกใส ซึ่งสามารถติดตามพฤติกรรมของการไหลและการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม โดยพบว่าการฉีดพลาสติกโฟมให้ได้เนื้อโฟมที่สม่ำเสมอ นั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีด, อุณหภูมิของแม่พิมพ์, ความหนืดของพลาสติก และลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ นอกจากนี้ลักษณะพื้นฐานของเนื้อโฟมยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้เป็นสารให้ฟอง รวมทั้งความสามารถในการละลาย (Solubility) และอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Diffusivity)

สำหรับกรพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม Ohshima และคณะ [3] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้แสดงผลการทำนายขนาดของรูพรุน และอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จึงให้ผลการทำนายเป็นที่น่าพอใจ Ohshima และคณะ ได้พัฒนาแบบจำลองจากสมการเคมีพื้นฐานของการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟม โดยแสดงให้เห็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น คือ พอลิอล (Polyol) และไอโซไซยานต (Isocyanate) รวมทั้งอัตราการเกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) มีผลโดยตรงต่อลักษณะพื้นฐานของโฟมที่ผลิตได้

Himanshu Sheth และ Lee Chen [4] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลอง เพื่อแสดงถึงการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม โดยกำหนดการศึกษาภายใต้สภาวะและเงื่อนไข ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของฟองก๊าซ (Cell growth model)

1. ฟองก๊าซมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยรัศมีของฟองก๊าซแปรผันตามเวลาเท่านั้น
2. ก๊าซภายในฟองก๊าซประพฤติตัวเป็นแบบก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)
3. สภาวะสมดุลที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวเป็นไปตามกฎของ Henry's law
4. มวลของก๊าซจะถูกละลายได้ ไม่นำมาเทียบกับมวลของของเหลว
5. คุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของก๊าซ
6. การขยายตัวของฟองก๊าซเป็นระบบที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
7. สามารถละเทอมของความหนืดทั้งในสมการโมเมนตัมได้
8. ระบบเป็นระบบปิด ไม่มีการสูญเสียก๊าซออกสู่สิ่งแวดล้อม
9. สามารถละทิ้งค่าความร้อนแฝงของการละลายและผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดจากการขยายตัวของก๊าซ
10. ค่าการยืดตัวของพื้นผิว (Surface elasticity) มีค่าน้อย ละทิ้งได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การประยุกต์และพัฒนาแบบจำลองตามแนวทางของ Ohshima และคณะ [3] มีประโยชน์ต่อการศึกษาปัจจัยหลักและการพัฒนาแบบจำลองการขีดพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อช่วยปรับลดของเสียและเศษขยะพอลิยูรีเทนโฟมจากมูลในงานฉีดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โฟม (Foam) [5-7]

"โฟม" หมายถึง วัตถุที่มีน้ำหนักเบา ภายในเนื้อที่มีรูฟองอากาศ ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ

"โฟม" หรือ "พลาสติกโฟม" หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงก๊าซเล็กๆ แทรกปะปนกระจายอยู่ทั่วทั้งเนื้อพลาสติก ซึ่งโพรงก๊าซเหล่านี้จะเกิดจากสารเคมีที่เรียกว่า "Blowing agent" หรือ "สารช่วยให้เกิดฟอง" เป็นตัวทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกโฟม เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานแตกต่างออกไป

"เซลล์ลาร์พลาสติก" หรือ "พลาสติกโฟม" หมายถึง พลาสติกที่ขยายตัว หรือพองฟูคล้ายฟองน้ำ โดยทั่วไปพลาสติกโฟม จะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัสดุ ได้แก่ วัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง และวัสดุที่เป็นก๊าซซึ่งเกิดขึ้นจากสารที่เรียกว่า "สารช่วยให้เกิดฟอง" สำหรับส่วนที่เป็นวัสดุของแข็งนั้น อาจประกอบด้วยพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งหรือมากกว่า เช่นในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน โฟมอาจมีลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature : T_g) ว่าอยู่ในช่วงที่ต่ำหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ในการผลิตโฟม, ระดับของการเกิดผลึก (Crystallinity) และระดับการเกิดโครงสร้างร่างแห (Cross-linking)

รูปทรงของเซลล์อาจเป็นแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด โฟมแบบเซลล์ปิดเหมาะสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อน และโดยทั่วไปจะมีลักษณะแข็ง ในขณะที่โฟมแบบเซลล์เปิดจะเหมาะสำหรับทำเบาะที่นั่งในรถยนต์, เฟอร์นิเจอร์ ฉนวนกันเสียง การใช้งานอื่นๆ ที่มีลักษณะยืดหยุ่น

อุตสาหกรรมหลักที่ใช้โฟมยืดหยุ่น (Flexible foam) ได้แก่ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์, การขนส่ง, การผลิตที่นอน, บรรจุกันชน, สิ่งทอ, ของเล่น, วงแหวนสำหรับอัดข้อต่อ, เบาะกัน, อุปกรณ์กีฬา, รองเท้า และวัสดุกันกระแทกต่างๆ

อุตสาหกรรมหลักที่ใช้โฟมคงรูป (Rigid foam) ได้แก่ อุตสาหกรรมก่อสร้าง, การขนส่ง, เครื่องใช้ไฟฟ้า, การผลิตถังและท่อ, บรรจุกันชน, เฟอร์นิเจอร์, ทุ่นลอย และการผลิตตู้เก็บอาหารและเครื่องดื่ม

2.2.1 การแบ่งประเภทของโฟม

- 1) การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ
 - โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ไม่ต่อถึงกัน
 - โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อถึงกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้



(ก) แบบเซลล์ปิด



(ข) แบบเซลล์เปิด

รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในของโฟม

2) การแบ่งประเภทโฟมตามประเภทของพลาสติก สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- โฟมชนิดเทอร์โมเซตติง (Thermosetting foam) : คือ พลาสติกโฟมที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใหม่ได้ โฟมประเภทนี้ที่รู้จักกันดี คือ พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) ซึ่งเป็นโฟมที่เกิดจากสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นสารผสมของเหลว ได้แก่ โฟมคงรูปและโฟมยืดหยุ่น เป็นต้น

- โฟมชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) : คือ พลาสติกโฟมที่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ได้แก่ EPS foam , EPE foam เป็นต้น ซึ่ง EPS foam (Expandable polystyrene foam) เป็นพลาสติกโฟมที่ประกอบด้วยสารพอลิสไตรีน มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ขนาดตั้งแต่ 0.3-2.5 มิลลิเมตร โดยอาศัยก๊าซเพนเทน เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง

2.2.2 การผลิตโฟม

ขั้นตอนทั่วไป สำหรับการเกิดพอลิเมอร์โฟม

1) การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง จะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือทั้งสองชนิด โดยอาศัยความร้อนจากภายนอกหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

2) กลไกการก่อให้เกิดฟองก๊าซในระบบของพอลิเมอร์ (พอลิเมอร์หลอมเหลว, สารละลายพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์แขวนลอย) โดยการเร่งของปฏิกิริยาหรือความร้อน ดังนั้น จะทำให้ฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์

3) การระเหยของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น สารฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) หรือเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) ที่อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการคายความร้อนหรือความร้อนจากภายนอก

4) การระเหย ซึ่งเป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซ เช่น ปฏิกิริยาของไอโซไซยานาตกับน้ำ จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขึ้นในระบบ

5) การขยายตัวของก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ จะขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของความดันในระบบ

6) การรวมตัวกันของฟองก๊าซ ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ การผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีทางกายภาพ คือ ใช้ก๊าซอัดหรือผสมสารเคมีทำให้เกิดก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน ก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพอลิเมอร์พองขึ้นเป็นโฟม ตัวอย่าง เช่น พอลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene)

2) วิธีทางเคมี คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีสองชนิดทำให้เกิดโฟม วัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยของเหลวหรือมากกว่านั้น โดยชนิดหนึ่งเป็นพอลิเมอร์เหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นส่วนผสมของวัสดุตกผลึกหรือตัวทำให้แข็งและสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เหลว เพื่อให้เกิดฟองก๊าซ ตัวอย่าง เช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam)

รูปแบบกระบวนการผลิตโฟม สามารถกระทำได้หลายวิธี กล่าวโดยสรุปได้ ดังนี้

- 1) การผลิตโฟมแบบแผ่น (Slabstock)
- 2) การผลิตโฟม โดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding)
- 3) การผลิต โดยใช้กระบวนการอาร์ไอเอ็ม (Reaction injection molding; RIM)
- 4) การผลิตโฟม โดยวิธีการผสมสารจากส่วนผสมตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป
- 5) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการสเปรย์ (Spray)
- 6) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการอัดรีด (Extrusion) ซึ่งจะให้สารช่วยในการขยายตัวแบบเม็ด
- 7) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)
- 8) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการหล่อ
- 9) การผลิตโฟม โดยใช้ก๊าซหรือสารละลายที่มีจุดเดือดต่ำ
- 10) การผลิตโฟมแผ่นบาง (Foam board production)
- 11) การผลิตโฟมแบบที่ใช้ประกอบ (Composite)
- 12) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation) [7]

2.3.1 การเกิดโฟม (Foam)

การเกิดโฟม เป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และ การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟม

การเกิดโฟม มีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์ และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองฟองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียส ทำให้เกิดกลุ่มของฟองจำนวนมากจะได้ภายในเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีคือ การลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ พอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก มีการนำความร้อนที่ไม่ดีและจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้วิธีการลดความดันมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ

กระบวนการเกิดโฟม ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การเกิดฟองก๊าซ (Bubble Formation) เป็นขั้นตอนที่เริ่มเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กๆ จำนวนมาก กระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์
- 2) การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble Growth) เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าไปในฟองก๊าซ, ผลจากการขยายตัวของฟองก๊าซ เมื่อได้รับความร้อนหรือความดันของระบบลดลง และผลจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซ (Coalescence) ของฟองก๊าซมากกว่า 2 ฟอง
- 3) การคงสภาพของฟองก๊าซ (Bubble Stability) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ฟองก๊าซในขั้นนี้ จะมีการคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

2.3.2 การหาจำนวนของฟองก๊าซในเนื้อโฟม

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วยฟองก๊าซ 1,000 ถึง 10,000 ฟอง โดยจะมีความแตกต่างของขนาดฟองก๊าซที่แท้จริงกับขนาดของฟองก๊าซโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของฟองก๊าซและการกระจายขนาดของฟองก๊าซไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการโฟมด้วย จำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโฟม (N_c) เป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการใช้อยู่บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารที่ทำให้

เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) หรือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น ตัวแปร N_c เป็นฟังก์ชันกับขนาดของฟองก๊าซและความหนาแน่นของโพลิเมอริก และจำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโพลิเมอร์ (N_c) มีค่าดังสมการ

$$N_c \cong \left(\frac{1 - \rho / \rho_p}{10^{-4} d} \right) \quad \dots(2.1)$$

โดยที่ N_c คือ จำนวนฟองก๊าซต่อปริมาตรโพลิเมอร์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร, ρ คือ ความหนาแน่นของโพลิเมอร์ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองก๊าซในหน่วยมิลลิเมตร

การเตรียมพอลิยูรีเทนโพลิเมอร์ที่ขึ้น จะต้องมีฟองก๊าซอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์อย่างเหมาะสม ถ้าเกิดฟองก๊าซเร็วเกินไป จะทำให้การขยายตัวของโพลิเมอร์ไม่เสถียร โดยจะเกิดการยุบตัวของเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้น ยังไม่ได้สร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเก็บกักก๊าซเหล่านี้ไว้ได้ แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเร็วเกินไป โพลิเมอร์จะไม่เกิดการขยายตัว ดังนั้น จำเป็นต้องควบคุมสภาวะที่มีผลกระทบในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนให้เหมาะสม

วิธีการผลิตพอลิเมอร์โพลิเมอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การทำให้เกิดการแพร่กระจายของก๊าซผ่านไปในสารละลายพอลิเมอร์และทำให้เกิดการคงสภาพเป็นโพลิเมอร์ ซึ่งวิธีการนี้ โพลิเมอร์จะขยายตัว โดยเป็นผลมาจากการขยายขนาดของฟองก๊าซก่อนที่พอลิเมอร์จะคงสภาพ โพลิเมอร์ที่ผลิตโดยอาศัยวิธีการแพร่กระจายของก๊าซ ได้แก่

- 1) เทอร์โมพลาสติคพอลิเมอร์ : เริ่มต้นกระบวนการจากพอลิเมอร์ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ทำการหลอมให้เป็นของเหลว จากนั้นทำให้เกิดฟองก๊าซภายในเนื้อพอลิเมอร์และทำการหล่อเย็นให้พอลิเมอร์มีสถานะกลับไปเป็นของแข็ง จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นพอลิเมอร์โพลิเมอร์
- 2) โพลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต : สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโพลิเมอร์ ขณะที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพียงบางส่วนและยังคงมีสภาพเป็นพอลิเมอร์เหลวอยู่ จากนั้นทำให้โพลิเมอร์มีสภาพเป็นเทอร์โมเซต (curing) จะเกิดเป็นโพลิเมอร์ที่มีความเสถียร
- 3) ลาเทค (Latex) คือ กระบวนการทำให้เกิดโพลิเมอร์ที่มีความเสถียร ซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่มีสถานะต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซที่ใช้ในการผลิตโฟม อาจจะได้มาจากหลายแหล่ง ดังนี้

1) อากาศภายในพอลิเมอร์เหลว ตัวอย่าง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจจะไม่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หรือหลอมเหลวที่ภาวะความดันปกติ และอาจจะเกิดการแพร่ ขยายตัว เมื่อความดันในระบบลดลง หรือเมื่อสารละลายที่มีจุดเดือดต่ำได้รับความร้อนจากปฏิกิริยา อาจจะไปเปลี่ยนไปเป็นฟองก๊าซได้

2) ก๊าซอาจจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับน้ำหรือการสลายตัวของสารพวกเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide)

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics model) [8-9]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถแบ่งออกตามวิธีการพัฒนาได้ 3 ประเภท

1) แบบจำลองทางทฤษฎี (Theoretical models) เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนา โดยใช้หลักการทางเคมีและฟิสิกส์

2) แบบจำลองที่ได้จากการทดลอง (Empirical models) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการใช้วิธีการทางสถิติวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3) แบบจำลองกึ่งการทดลอง (Semi-empirical models) เป็นแบบจำลองที่อาศัยทั้งค่าตัวแปรจากแบบจำลองทางทฤษฎีและการค่าตัวแปรบางค่าจากข้อมูลการทดลอง หลักการในการพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ก) หลักอ้างอิงพื้นฐาน (Basis)

ข) การตั้งสมมติฐาน (Assumption)

ค) ความแน่นอนของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical consistency of model)

ง) การหาค่าผลลัพธ์ของสมการที่ใช้ในแบบจำลอง (Solution of the model equation)

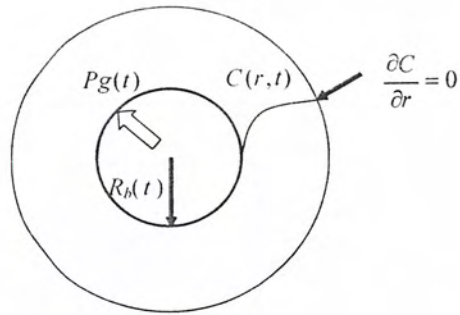
จ) การตรวจสอบผลลัพธ์ (Verification)

ในงานวิจัยนี้ นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซภายในพอลิยูรีเทนโฟม โดยใช้ผลข้อมูลจากการทดลองจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส ซึ่งทำการควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวที่ค่าต่างๆ

โดยกำหนดสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

1. กำหนดให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นทรงกลม
2. ก๊าซภายในฟองก๊าซประพฤติตัวเป็นแบบก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)
3. ละทิ้งเทอมความหนืดของพอลิเมอร์
4. ระบบเป็นระบบปิด ไม่มีการสูญเสียก๊าซออกสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของฟองก๊าซที่ใช้ในการคำนวณ

จากสมการของก๊าซอุดมคติ

$$P(t)V(t) = n_{CO_2}(t)RT(t) \quad \dots(2.2)$$

$$\frac{4}{3}\pi[r(t)]^3 = \frac{n_{CO_2}(t)RT(t)}{P(t)} = f(t) \quad \dots(2.3)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{df(t)}{dt} \quad \dots(2.4)$$

โดยที่ $P(t)$ คือ ค่าความดันภายในของฟองก๊าซ (atm)

$V(t)$ คือ ปริมาตรต่อหนึ่งฟองก๊าซ (cm^3)

$\frac{dV(t)}{dt}$ คือ อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซ ($\frac{cm^3}{s}$)

$r(t)$ คือ รัศมีของฟองก๊าซ (cm)

$n_{CO_2}(t)$ คือ จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ $82.057 \frac{cm^3 \cdot atm}{gmol \cdot K}$

$T(t)$ คือ อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ (K)

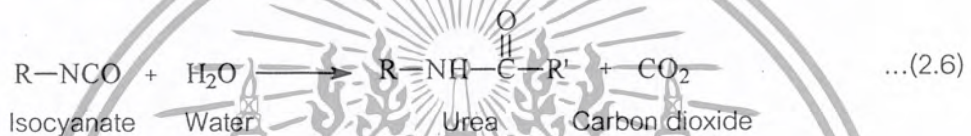
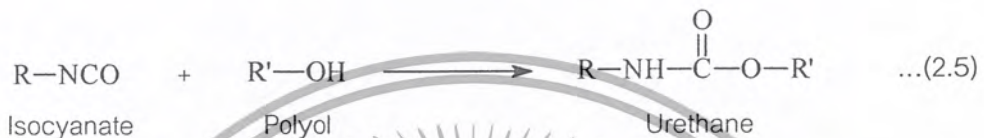
t คือ เวลา (s)

การหาค่าของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ; $T(t)$ สามารถคำนวณได้ โดยอาศัยผลของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ จากการทดลองศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดฟอง นำมาใช้โปรแกรมพอลิแมท (Polymath®) และโปรแกรมเอ็กเซล (Excel®) ช่วยในการสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะของสมการพหุนาม (Polynomial equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าความดันภายในของฟองก๊าซที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา; $P(t)$ ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง ทางคณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีการคำนวณจากความสัมพันธ์ของก๊าซอุดมคติ และใช้โปรแกรมพอลิแมทคำนวณค่า $P(t)$ โดยอ้างอิงผลของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และปริมาตรของโฟมที่ได้จากการทดลอง

การหาค่าของจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา; $n_{CO_2}(t)$ ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง เนื่องจากกระทำได้ยากและมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้อ้างอิงข้อมูลในส่วนนี้ จากงานวิจัยของ Ohshima และคณะ [3] ที่ได้ทำการทดลองศึกษาการทำปฏิกิริยาของพอลิออลและไอโซไซยาเนต ดังสมการ



เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและวัดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยใช้ NIR สเปกโตรมิเตอร์ โดยอาศัยหลักการทางด้านจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากสมการ โดยกำหนด A : Polyol, B : Isocyanate, C : Urethane, D : Water, E : CO₂, F : Urea

$$k_1 = 180 \frac{s}{\text{mol} \cdot m^3} \text{ และ } k_2 = 1490 \frac{s}{\text{mol} \cdot m^3}$$

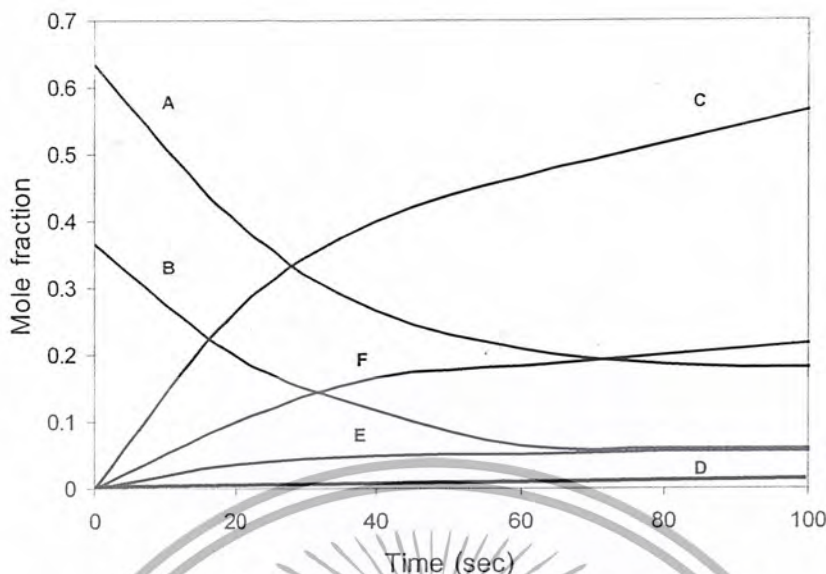
$$E_{a1} = 39767 \frac{J}{\text{mol}} \text{ และ } E_{a2} = 44423 \frac{J}{\text{mol}}$$

สามารถแสดงสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนี้

$$r_1 = k_1 \exp\left(\frac{-E_{a1}}{RT}\right) \left(\frac{\rho_{poly} x_{A,poly}}{m_A}\right) \left(\frac{\rho_{poly} x_{B,poly}}{m_B}\right) \dots(2.7)$$

$$r_2 = k_2 \exp\left(\frac{-E_{a2}}{RT}\right) \left(\frac{\rho_{poly} x_{A,poly}}{m_B}\right) \left(\frac{\rho_{poly} x_{B,poly}}{m_D}\right) \dots(2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน

2.5 พอลิยูรีเทน (Polyurethane) [10-12]

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน ($-\text{NHCOO}-$) เป็นหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวอยู่ภายในโมเลกุล ซึ่งหมู่ของยูรีเทนสามารถเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดออล (Diols) และไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, $-\text{OH}$) อยู่ในโมเลกุลตั้งแต่สองหมู่หรือมากกว่า (Diols or polyols) กับไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีโมเลกุลของหมู่ไอโซไซยาเนตมากกว่าหนึ่งหมู่ (Diisocyanate or polyisocyanate) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerization) และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้น จะทำให้สารช่วยให้เกิดฟอง ซึ่งเป็นพวกฟลูออโรคาร์บอนเกิดการระเหยในขั้นตอนการเกิดพอลิเมอไรเซชัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟม หรืออาจใช้น้ำผสมกับพอลิออล ดังนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น

เริ่มมีการพัฒนาการผลิตพอลิยูรีเทนในเชิงการค้าในประเทศเยอรมัน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 โดยบริษัท I.G. Farbenindustrie จากปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับไกลคอล (Glycol) จะได้พอลิยูรีเทน ซึ่งมีสมบัติเป็นพลาสติกและเส้นใย ต่อมาพบว่าสามารถทำเป็นกาว, วัสดุเคลือบผิว และโฟมแข็งได้ด้วย ในปี ค.ศ. 1950 บริษัท Bayer (เยอรมัน) เริ่มผลิตพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์เพื่อวางจำหน่าย ต่อมาในปี ค.ศ. 1952 สามารถผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นได้ ในปี ค.ศ. 1955 ได้มีการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนอย่างกว้างขวาง โดยใช้พอลิเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีปลาย

โมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล 2 ข้างเป็นพอลิเอทิล และในปี ค.ศ. 1957 การผลิตพอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิอีเทอร์ที่มีปลายโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล แทนการใช้พอลิเอทิล เนื่องจากมีต้นทุนถูกและทนต่อกรด-ด่างได้ดีกว่า

2.5.1 ชนิดของพอลิยูรีเทน (Types of polyurethanes)

พอลิยูรีเทน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. พอลิยูรีเทนโฟม (Foam polyurethane)
2. พอลิยูรีเทนแบบแข็ง (Solid polyurethane)
3. พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Solid polyurethane elastomers)
4. สารยึดติด, สารเคลือบผิว และสี (Adhesive, coating, paints)

สำหรับในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะชนิดของพอลิยูรีเทนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ พอลิยูรีเทนโฟม

พอลิยูรีเทนโฟม สามารถแบ่งโดยใช้เกณฑ์ของความหนาแน่น ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ (Low density flexible foam)

- สมบัติและการนำไปใช้งาน

โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ เป็นโฟมที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 10-80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบร่างแห เนื้อโฟมมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิด ซึ่งจะทำให้อากาศสามารถไหลผ่านภายในโครงสร้างได้โดยง่าย พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นนี้ จะมีความต้านทานแรงดึงสูง ทนทานต่อตัวทำละลายหลายชนิด แต่จะสลายตัวลงโดยกรด-เบสและไอน้ำ นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนที่แข็ง สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 150 องศาเซลเซียส

โฟมยืดหยุ่น จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเบาะเฟอร์นิเจอร์, เบาะรถยนต์, หมอนพนักรถยนต์, พวงมาลัยรถยนต์, สปอยเลอร์รถยนต์และวัสดุกันกระแทกต่างๆ เป็นต้น

- การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น

ก๊าซที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นได้ โดยทั่วไป คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตและน้ำ ดังนั้น ระบบจะประกอบด้วยไดไอโซไซยาเนต, พอลิเอทิลและน้ำ โดยพอลิเอทิลใช้นั้น มักใช้พอลิเอทิลและพอลิอีเทอร์ สำหรับเหตุผลที่ใช้พอลิเอทิล เพื่อต้องการให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงและมีความยืดหยุ่น (Flexibility)

2) โฟมคงรูปความหนาแน่นต่ำ (Low density rigid foam)

- สมบัติและการนำไปใช้งาน

โฟมคงรูปความหนาแน่นต่ำ ภายในเนื้อโฟมจะมีโครงสร้างแบบร่างแหอยู่ในปริมาณมาก ลักษณะของเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิด ผนังของฟองก๊าซภายในเนื้อโฟมยังคงโครงสร้างอยู่ ดังนั้น การเคลื่อนที่ของก๊าซจึงเกิดขึ้นไม่ได้ โฟมประเภทนี้ มีสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับพอลิยูรีเทนโฟม

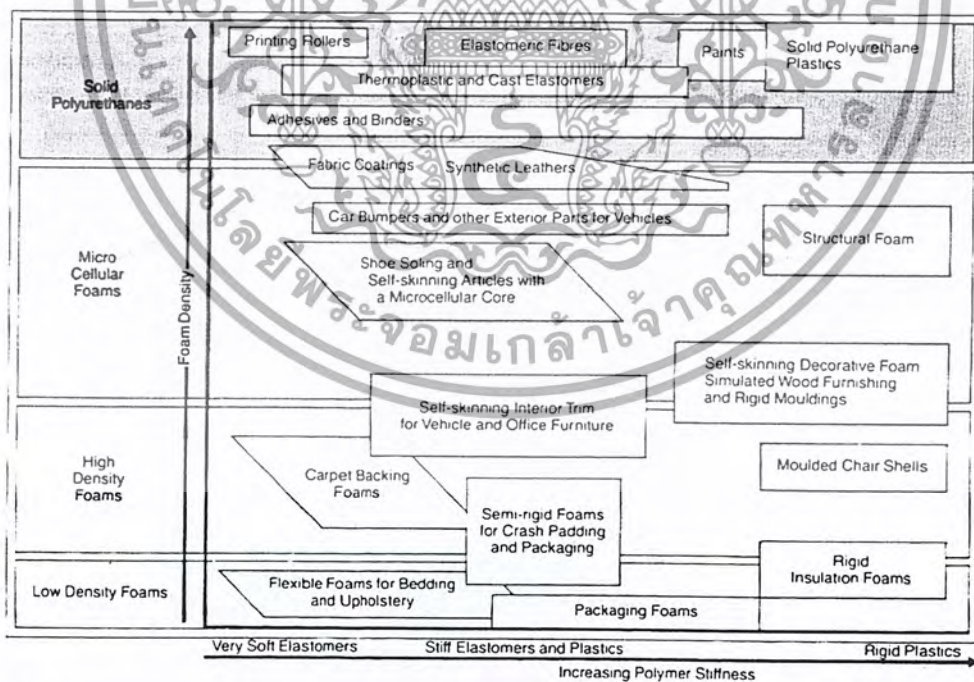
ชนิดยืดหยุ่น มีความแข็งแรงที่สูง ซึ่งจะสัมพันธ์กับน้ำหนักของโฟม, มีความทนทานต่อการกดอัด, มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถต่อต้านน้ำมันและแก๊สไฮโดรเจนเป็น อย่างดี โดยจะมีความหนาแน่นของเนื้อโฟมมากกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

พอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง ส่วนใหญ่ใช้งานเป็นฉนวนความร้อน (Insulator) ในตู้เย็น, ในการก่อสร้าง, ผนังห้องเย็น, ภาชนะเก็บความร้อนและเย็น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของ เรือเพื่อลดน้ำหนักของเรือและทำให้การลอยตัวดีขึ้น

- การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid urethane foam)

การเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดนี้ อาศัยหลักการเดียวกับการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น กล่าวคือ ใช้สารตั้งต้นประเภทเดียวกันและก๊าซชนิดเดียวกัน แตกต่างกันเพียงค่าองศาของการ เชื่อมโยง โดยที่โฟมชนิดนี้มีค่าองศาของการเชื่อมโยงสูงมาก ซึ่งทำได้โดยใช้พอลิออกไซด์ที่มีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำ

3) โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นสูง (High density flexible foam) : มีความหนาแน่นของ เนื้อโฟมมากกว่า 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยช่วงความหนาแน่นนี้จะรวมถึงโฟมแบบ self- skinning foams และ microcellular elastomers ซึ่ง self-skinning foam มีโครงสร้างของเซลล์ 2 แบบ คือ แบบเซลล์เปิด จะมีความหนาแน่นประมาณ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ แบบเซลล์ปิด จะมีความหนาแน่น 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนโฟมชนิด microcellular elastomers จะมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างต่ำและโดยทั่วไปก็มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติการใช้งานของพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม
 สารเคมีสำคัญที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน มีดังต่อไปนี้

2.5.2.1 พอลิออล (Polyols)

พอลิออล ถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทน โดยที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของพอลิออลที่ใช้ จะเป็นพอลิออลชนิด พอลิอีเทอร์ (Polyether) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ และถ้าใช้พอลิออลชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติเฉพาะ แต่โดยปกติราคาของพอลิเอสเทอร์จะแพงกว่าพอลิอีเทอร์ ดังนั้น การเลือกพอลิออล จะต้องพิจารณาถึงขนาดและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง, ค่าฟังก์ชันนอลิตี (Functionality) ซึ่งเป็นปริมาณของไฮโซไซยานตกับปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลต่อปริมาณพอลิออล และระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหในโมเลกุล ซึ่งค่านี้ จะส่งผลต่อการควบคุมความแข็งและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ นั่นคือ โฟมคงรูป ต้องการโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งตัว จำเป็นต้องใช้พอลิออลที่มีค่าระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่สูง แต่สำหรับโฟมยืดหยุ่น ต้องการพอลิออลที่มีระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่ต่ำ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิออลสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทน

Characteristic	Flexible foams and elastomers	Rigid foams, rigid plastics and stiff coatings
Molecular weight range	1,000 to 6,500	150 to 1,600
Functionality range	2.0 to 3.0	3 to 8
Hydroxyl value range (mg KOH/g)	28 to 160	250 to 1,000

เดิมการเตรียมพอลิยูรีเทน สามารถใช้สารอะลิฟาติกไดออล (ไกลคอล) เช่น 1,4-บิวเทนไดออล แต่ปัจจุบันนิยมใช้สารประกอบพอลิเมอร์ไฮดรอกซี (Polymeric hydroxyl) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่มากนัก เช่น พอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ได้มีสมบัติการใช้งานได้กว้างขวาง

- พอลิอีเทอร์ (Polyethers)

พอลิอีเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี ($H-(OR)_n-OH$) จัดว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน พอลิอีเทอร์ไตรออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง (ประมาณ 3000) มักใช้ผลิตโฟมยืดหยุ่น ในขณะที่พอลิอีเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 500 มักจะใช้ผลิตโฟมคงรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน

พอลิแอลกอฮอล์	น้ำหนักโมเลกุล	หมู่ฟังก์ชัน
$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	400-4000	2
$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{OH} \end{array}$	300-6000	3
$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{HOCH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$	400-600	4
$\begin{array}{c} \text{HOCH}_2-\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}-\text{CH}_2\text{OH} \\ \quad \quad \quad \\ \text{OH} \quad \text{OH} \quad \text{OH} \quad \text{OH} \end{array}$	350-750	6

- พอลิเอสเทอร์ (Polyester)

พอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี ($-(\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{R}-\text{O})_n-\text{OH}$)

จัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน เกิดจากการใช้ไดแอซิด เช่น กรดอะดีปิก, กรดเซบาซิก เป็นต้น ทำปฏิกิริยากับไดแอลกอฮอล์ที่มากเกินไป (Excess) น้ำหนักโมเลกุลที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1000-4000

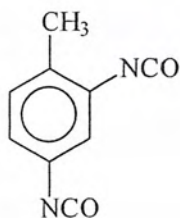
2.5.2.2 ไอโซไซยาเนต (Isocyanate)

ไอโซไซยาเนตถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทน วิธีการที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน คือ การปรับเปลี่ยนชนิดของไอโซไซยาเนตที่ใช้ โดยที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทน พบว่า จะใช้ไอโซไซยาเนตที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI) และไดไอโซไซยาเนตไดฟีนิลมีเทน (Diisocyanatodiphenylmethane, MDI) หรืออาจใช้อนุพันธ์ของสาร 2 ชนิดนี้

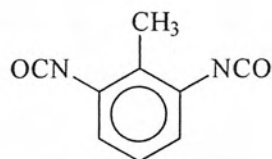
- โทลูอินไดไอโซไซยาเนต สามารถเตรียมได้โดยใช้โทลูอิน (Toluene) เป็นสารตั้งต้น ซึ่งผลิตผลสุดท้ายจะเป็นของผสมของโทลูอินไดไอโซไซยาเนต 2 ไอโซเมอร์ คือ โทลูอิน 2,4 ไดไอโซไซยาเนต (2,4-diisocyanate) และโทลูอิน 2,6 ไดไอโซไซยาเนต (2,6-diisocyanate) ซึ่งของผสมของไอโซเมอร์ทั้ง 2 นี้ มีสถานะเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิห้อง โทลูอินไดไอโซไซยาเนตที่นิยมส่วนใหญ่ จะเป็นของผสมระหว่างสาร 2 ชนิด คือ 2,4 และ 2,6 ไอโซเมอร์ ในสัดส่วน 80 : 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ไอโซไซยาเนตชนิดนี้ จะใช้ในการผลิตโฟมความหนาแน่นต่ำ สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตร่วมกันกระแทก



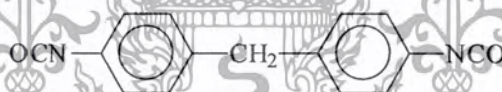
(2,4-diisocyanate)



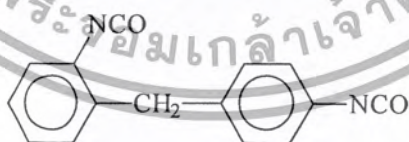
(2,6-diisocyanate)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไอโซไซยาเนต

- ไดเฟนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate, DPMDI หรือ MDI) ผลิตได้จากสารตั้งต้นอะนิลีน (Aniline) และฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ polymeric MDI ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโฟมแบบแข็ง นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิต polymeric MDI จะสามารถแยก MDI บริสุทธิ์ ออกมาใช้เป็นสารเคมีพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป



(4,4'-diphenylmethane diisocyanate)



(2,4'-diphenylmethane diisocyanate)

รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของไดเฟนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานของ MDI ที่ค่าฟังก์ชันนอลิตีในช่วง 2.0-3.0

Average functionality	Product description	Polyurethane type	Main applications
2.0	Pure MDI	High performance elastomers	Shoe-soles, Spandex fibres, Flexiole coatings, Thermoplastics
2.01 - 2.1	Modified, liquid pure MDI	High performance elastomers, Microcellular elastomers	Shoe-soles, Flexible coatings, RIM and RRIM, Cast elastomers
2.1 - 2.3	Liquid, low functionality polyisocyanates	Flexible semi-rigid and rigid (structural) foams, One-component froth	Automotive parts, Cabinets for electronic equipment, Insulating sealants, Cast elastomers
2.5	Low viscosity liquid polyisocyanates	High density flexiole foams, Structural foams	Foam-backs for carpets/vinyls, Computer cabinets and other moulded articles
2.7	Low viscosity polymeric MDI	Low density rigid foams, Semi-rigid foams, Isocyanurate foams, Particle binders	Insulating foams, Energy absorbing foams, Isocyanurate foam building panels, Mine-face consolidation, Chloboard and laundry sand binders
2.8 - 3.1	High functionality polymeric MDI	Rigid polyurethane and isocyanurate foams	Continuous lamination of rigid foam and rigid foam slabstock

2.5.2.3 สารเติมแต่ง (Additive)

นอกจากพอลิไอโซไซยานตและพอลิออล ซึ่งเป็นสารเคมีสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทนแล้ว ยังมีสารเคมีอื่นๆ ที่เติมลงในขั้นตอนการผลิต เพื่อช่วยควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน สารเติมแต่งเหล่านี้ ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst), สารเร่งการเกิดโครงสร้างร่างแห (Cross-link agents), สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agents), สารลดแรงตึงผิว (Surfactants), เม็ดสี (Coloring materials), ฟิลเลอร์ (Filler), สารลดการเกิดควัน (Smoke suppressants) และสารต้านการติดไฟ (Flame retardants)

ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งที่เติมในปฏิกิริยาของไอโซไซยานตกับพอลิออล มีหลายชนิด โดยตัวเร่งที่เป็นที่นิยม ได้แก่ สารพวกอะลิฟาติกและอะโรมาติก เทอเทียรี เอมีน (Aliphatic and aromatic tertiary amine) และสารประกอบของ Organo-metallic โดยเฉพาะ สารประกอบของดีบุก (Tin)

- tertiary amines เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม โดยที่ค่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Catalytic activity) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและสภาพความเป็นเบส (Basicity) ของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- organo-metallic เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น สารประกอบในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้ คือ stannous octoate โดยทั่วไปจะใช้ในกระบวนการผลิตแบบอาร์ไอเอ็ม (Reaction injection mold, RIM)

ข) สารช่วยให้เกิดฟอง

พอลิยูรีเทนโฟม สามารถผลิตได้โดยใช้สารช่วยให้เกิดฟอง เพื่อที่จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารช่วยให้เกิดฟองที่นิยมใช้กับพอลิยูรีเทนโฟม คือ CFCs หรือ HCFEs ซึ่งเป็นสารเคมีที่ฤทธิ์ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone-depleting chemicals : ODCs) มักพบในพอลิยูรีเทนโฟมแบบคงรูปเท่านั้น ส่วนน้ำและ Methylene chloride เป็นสารช่วยให้เกิดฟองชนิดที่ไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะพบในพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น สำหรับพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น โดยปกติจะทำการทำปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับน้ำ, ไตรคลอโรโมโนฟลูออโรมีเทน (Trichloromonofluoromethane, CFC11) เพื่อให้เกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น

สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้ได้ผลดี จะต้องละลายเข้ากับพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวในปริมาณที่เพียงพอในสภาวะที่ความดันสูงพอเหมาะ แต่อย่างไรก็ตาม ณ อุณหภูมิแวดล้อม จะต้องไม่ละลายจนเกินไปเข้าไปในผนังเซลล์ของพอลิเมอร์ที่ขยายตัว สารช่วยให้เกิดฟองจะต้องผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์อย่างช้าๆ และช้ากว่าอากาศ เพราะหากการผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของสารช่วยให้เกิดฟองเร็วกว่าอากาศจะเป็นสาเหตุให้ไม่เกิดการหดตัวในช่วงอายุการใช้งาน

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง

ชนิดสารช่วยให้เกิดฟอง	น้ำหนักโมเลกุล	ความหนาแน่น (กรัมต่อเซนติเมตร ³)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Cyclohexane	84.00	0.774	80.8
Trichloethylene	131.40	1.466	87.2
1,2 Dichloroethane	98.97	1.245	83.5
1,1,2-Trichlorotrifluororthane	187.39	1.565	47.6
Acetone	58.08	0.785	56.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

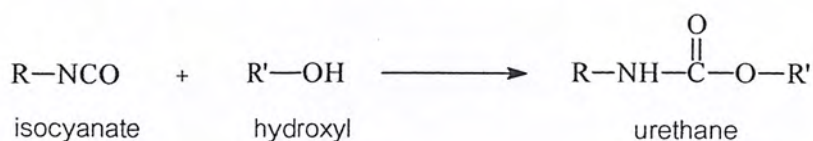
ตารางที่ 2.5 วัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ

Additive	Type of material	Purpose
Catalysts	Tertiary amines Organometallic compounds	To speed up the reaction of isocyanate and polyol
Cross-linking chain-extending agents	Polyols Polyamines	To give polymer cross-linking or to introduce specialised polymer segments
Blowing agents	Water (reacts with isocyanate giving carbon dioxide gas). Chlorofluoromethanes	To produce foamed structures
Surfactants	Silicone fluids	To aid and help foam-forming processes
Colours	Various pigments Carbon black	To identify different foam grades and for aesthetic reasons
Fillers	Particulate inorganic materials Fibres (chopped, milled or as continuous fibres, nets or scrim)	To modify properties (stiffness, fire performance etc.)
Flame retardants	Phosphorus or halogen-containing molecules	To reduce flammability
Smoke suppressants	Particulate inorganic and/or organic materials. (polycarboxylates, hydrated oxides, borates, etc.)	To reduce the amount of smoke or to slowdown the rate of smoke production on burning.

2.5.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

2.5.3.1 ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของไอโซไซยาเนต แบ่งออกได้เป็น

1) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับพอลิออล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับพอลิออล เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอัตราเร็วของการเกิดพอลิเมอไรเซชันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของไอโซไซยาเนตและพอลิออล โดยที่อะลิฟาติกพอลิออล (Aliphatic polyols) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบปฐมภูมิ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต จะมีอัตราเร็วกว่าพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบทุติยภูมิ ประมาณ 10 เท่า สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลกับไอโซไซยาเนตจะช้ามากและพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นนั้น จะสลายตัวกลับเป็นสารตั้งต้นได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อน เรียกปฏิกิริยาผกผันนี้ว่า Blocked isocyanate

2) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับน้ำ



ปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ยูเรีย และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยานี้จัดเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการเกิดฟองก๊าซของอุตสาหกรรมการผลิตโฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะเกิดเป็นกรดคาร์บามิก (Carbamic acid) และจะแตกตัวเป็นเอมีนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

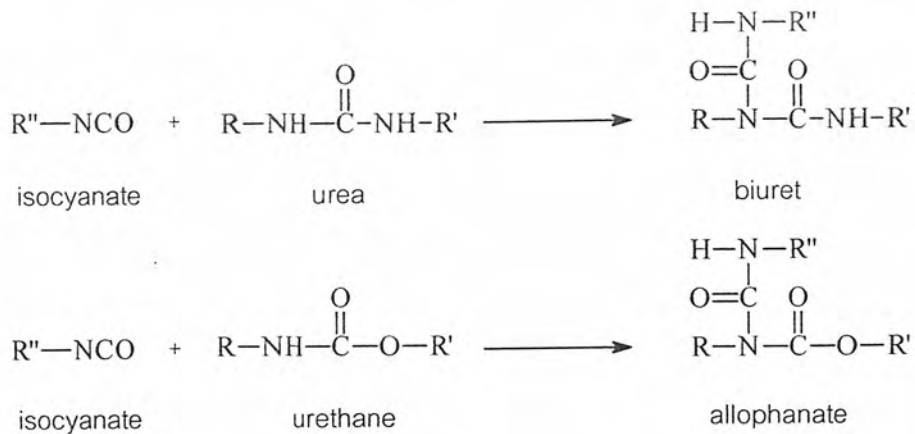
3) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับเอมีน



สำหรับปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับสารประกอบของเอมีนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารพวกไดเอมีน (Diamine) ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเอมีนจะเพิ่มขึ้นตามความเป็นเบสและเอมีนแบบอะลิฟาติกจะว่องไวกว่าเอมีนแบบอะโรมาติก

2.3.3.2 ปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ของไอโซไซยาเนต

ไอโซไซยาเนตภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลของยูเรียและยูรีเทน เกิดเป็นพันธะไบยูเรต (Biuret) และพันธะอัลโลฟอสเฟต (Allophonate) ตามลำดับ ทั้งสองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นปฏิกิริยาของการเกิดโครงสร้างร่างแหและปฏิกิริยาของหมู่ยูเรียจะเกิดได้รวดเร็วและเกิดที่ภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าของหมู่ยูรีเทน



2.5.4 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟม

กระบวนการเตรียมโฟมยืดหยุ่นที่ใช้ทั่วไปมี 3 แบบ คือ one-shot , prepolymer และ quasi-prepolymer

- One-shot polyester foams and one-shot polyether foams

วิธีนี้นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง โดยจะใช้พอลิเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2000 ปกติจะเตรียมจากกรดอะไดคกับไดเอธิลีนไกลคอล หรือใช้พอลิอีเทอร์ได้ผลผลิตเป็นของเหลวหนืด ของผสมทั้งหมดผ่านเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ประมาณ 2-3 นาที โฟมจะเกิดเต็มที่ การทำเป็นรูปร่างต่างๆ ใช้เครื่องมือ Hencke type

- Polyether prepolymer

วิธีนี้ให้พอลิอีเทอร์ทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานต่มากเกินพอก่อน จะได้พรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ปลายโมเลกุลเป็นไอโซไซยาเนต ซึ่งเสถียรในภาชนะที่แห้ง ถ้าเติมน้ำและตัวเร่งลงไปรวมทั้งตัวปรับปรุง จะเกิดโฟมชนิดยืดหยุ่นตามต้องการ วิธีนี้ราคาถูกกว่าวิธีในข้อ 1.

- Quasi-prepolymer polyether foams

วิธีนี้คล้ายๆ วิธีแบบ Prepolymer แต่ใช้ปริมาณไดไอโซไซยาเนตปริมาณมากๆ ทำปฏิกิริยากับพอลิอีเทอร์ จะได้พอลิยูรีเทนน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ และมีไดไอโซไซยาเนตอิสระเหลืออยู่มาก ผ่านเข้าไปในขั้นที่ 2 เพื่อทำปฏิกิริยากับพอลิอีเทอร์ เติมน้ำ เติมตัวเร่งและตัวดัดแปลงลงไป จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมยืดหยุ่น วิธีนี้จะช่วยลดความหนืดของ prepolymer ลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลในขั้นตอนแรกจะต่ำทำให้ผลิตง่ายขึ้น

2.6 Reaction Injection Molding Process (RIM)

RIM คือ กระบวนการที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ประกอบไปด้วยการฉีดหลายๆ สารเคมี (โดยทั่วไปจะเป็น 2 ชนิด) ลงในแม่พิมพ์ในอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการใช้งานแบบฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ซึ่งจะเป็นลักษณะการไหลในทิศทางตรงกันข้ามและมาผสมกันที่บริเวณหัวฉีด เพื่อให้เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบแข็ง (solid polymeric) ของเหลวที่ใช้จะมีความว่องไวสูง, ค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะโมเลกุลแบบร่างแหตามรูปแบบของแม่พิมพ์

ในส่วนของการผลิตพอลิยูรีเทน โดยวิธีอาร์ไอเอ็ม โดยทั่วไปในกระบวนการผลิต จะทำการฉีดสารเคมีที่เป็นของเหลว 2 ชนิด คือ พอลิอล และ ไอโซไซยาเนต เข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ

ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้ มีการใช้กระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยวิธีอาร์ไอเอ็ม อย่างกว้างขวาง เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- สามารถผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ได้ ชิ้นส่วนที่ขนาดจนถึงประมาณ 10 กิโลกรัม สามารถผลิตได้ด้วยเครื่องจักรพื้นฐานทั่วไป สำหรับชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ จะต้องใช้เครื่องจักรพิเศษที่มีความสามารถผลิตชิ้นงานได้สูง แต่จะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น
- ความต้องการพลังงานต่ำ ใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปอื่นๆ
- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์มีราคาต่ำ แม้แต่ในการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ กระบวนการต้องการเพียงแค่แม่พิมพ์ที่มีน้ำหนักเบาและอุปกรณ์กำเนิดแรงดันเท่านั้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์จะพบว่า กระบวนการอาร์ไอเอ็มจะต่ำกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic injection molding; TIM)
- สามารถผลิตอีลาสโตเมอร์ของพอลิยูรีเทนโดยกระบวนการอาร์ไอเอ็ม ให้มีความเหนียว (Tough) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ที่ดี
- ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เกลี้ยงเกลา ทาหรือพ่นสีได้ดี ปราศจากรอยหมุนวน (Swirl mark) สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เกรดเอได้
- สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปแบบซับซ้อนยุ่งยากได้โดยตรง เนื่องมาจากการใช้ส่วนผสมซึ่งเป็นของเหลวมีความหนืดต่ำและมีการขยายตัวหลังจากทำปฏิกิริยากัน ช่วยให้ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์ที่ซับซ้อนได้ดี
- การขึ้นรูป โดยกระบวนการอาร์ไอเอ็ม จะเกิดตำหนิที่พื้นผิว (Surface defect) หรือสิ่งกีดขวางน้อยกว่าการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก
- สิ่งเติมหรือแทรกลงไปเพื่อเสริมแรง สามารถรวมตัวเข้าด้วยกันโดยสมบูรณ์กับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชิ้นงานทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กไม่ได้รับผลจากความเค้นของแม่พิมพ์ (Molding stress) โดยไม่ต้องใช้ระบบท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีราคาแพง
- สามารถดำเนินการผลิตที่อัตราการผลิตขนาดสูงที่เหมาะสมทางการค้า
- การเคลือบสีที่ผิวหน้า ช่วยป้องกันด้านทานความเสียหายได้ดีมาก

โดยทั่วไปงานหรือชิ้นส่วนที่ขนาดใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อน เหมาะสมที่ใช้กระบวนการอาร์ไอเอ็ม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไอเอ็ม (Thermoplastic injection molding; TIM) ซึ่งกระบวนการที่ไอเอ็ม จะใช้งานกับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยจะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์และทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานระหว่างกระบวนการ RIM กับ TIM

คุณสมบัติการใช้งาน	RIM	TIM
อุณหภูมิของสารที่ทำการฉีด	45 °C	200 °C
อุณหภูมิของแม่พิมพ์	70 °C	25 °C
ความหนืดของสารที่ทำการฉีด	0.1-1 Pa.S	100-100,000 Pa.s
ความดันที่ใช้ในการฉีด	10 Mpa	100 Mpa
mold clamping force (for 1 m ² part)	50 ton	3000 ton
เวลาที่ใช้ในการฉีด	50-180 s	70-100 s
การนำเศษชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่	ไม่มี	มี
เศษของเสียจากการตกแต่งชิ้นงาน	10-15%	10%
ชิ้นงานที่มีตำหนิ	2%	3%
พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำหนัก	7,900 kJ/kg	18,600 kJ/kg
molded in stress	ไม่มี	สูง

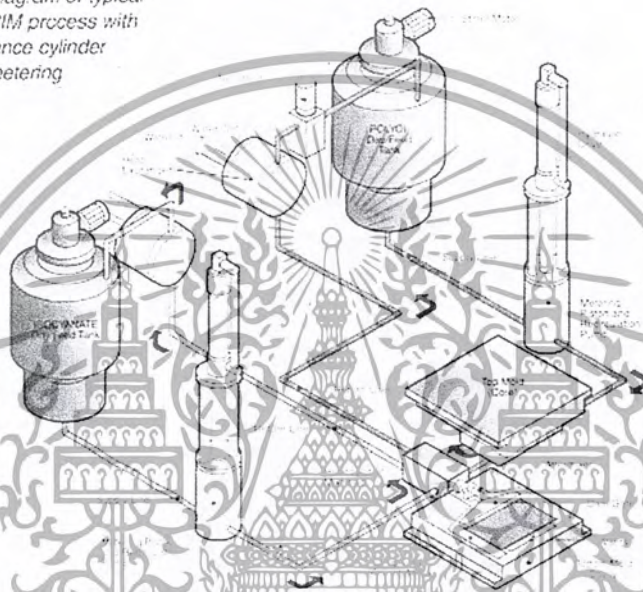
2.6.1 ขั้นตอนการทำงาน

- เตรียมสารเคมีทั้ง 2 ชนิดให้อยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมก่อนทำการฉีด เช่น การปรับช่วงอุณหภูมิให้เหมาะสม และการแยกก๊าซออก เป็นต้น
- เตรียมสารเคมีแต่ละชนิดในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาและทำการป้อนเข้าสู่บริเวณหัวฉีด โดยใช้ปั๊มควบคุม

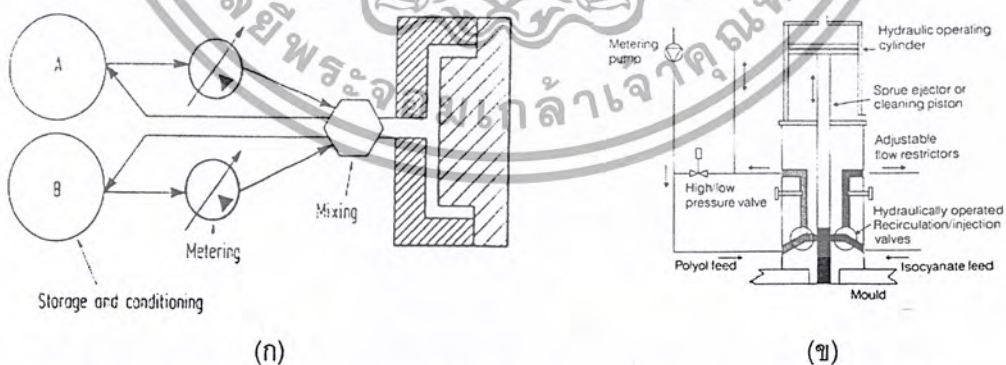
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการผสมสารเคมีทั้งสองเข้าด้วยกันบริเวณหัวฉีด เพื่อให้เกิดเป็นสารผสมที่พร้อมสำหรับการฉีดเข้าในแม่พิมพ์
- ทำการฉีดสารผสมผ่านทางช่องที่ได้ทำการออกแบบไว้ลงในแม่พิมพ์ พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้เหมาะสม โดย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) และหลีกเลี่ยงการเกิดช่องว่างอากาศ (Air entrapment)
- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และรอให้พอลิเมอร์ขยายตัวจนเต็มแม่พิมพ์
- การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และทำการตกแต่งชิ้นงาน

Diagram of typical RIM process with lance cylinder metering



รูปที่ 2.8 แผนภาพกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยใช้วิธี Reaction injection molding



รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ Reaction injection molding (ก) และหลักการ
ทำงานของหัวผสม (Piston-ejector mixers) (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ RIM

2.6.2.1 วัสดุที่ใช้ในทำแม่พิมพ์ (Material)

การเลือกวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ จะขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์, ชนิดและอนุภาคของพื้นผิวงานที่ต้องการ, อัตราการผลิตต่อแม่พิมพ์ และความเป็นไปได้ในการปรับปรุงแม่พิมพ์ในอนาคต

โลหะเป็นวัสดุที่มีความทนทานสำหรับการจัดทำแม่พิมพ์และเหมาะสมสำหรับการใช้งานในกระบวนการอาร์ไอเอ็ม แม่พิมพ์แบบอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin mold) หรือแม่พิมพ์โลหะที่มีการเติมอีพอกซีเรซิน (Metal filled epoxy mold) สามารถให้ความแข็งแรงเพียงพอสำหรับกระบวนการ RIM และง่ายต่อการปรับปรุง เหมาะสำหรับงานที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก สาเหตุสำคัญเนื่องจาก คุณภาพของพื้นผิว, การผ่อนคลายและความเร็วของการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Release) จะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับคุณภาพพื้นผิวแม่พิมพ์และการควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิวแม่พิมพ์ เนื่องจากระบบนี้จะมีความร้อนเกิดขึ้นสูง ความร้อนนี้ต้องถูกถ่ายเทออกจากพื้นผิวแม่พิมพ์ก่อนที่จะนำชิ้นงานออก พื้นผิวของแม่พิมพ์แบบอีพอกซีเรซินจะด้อยกว่าของแม่พิมพ์โลหะในด้านของคุณภาพและความคงทน รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิเป็นผลให้เกิดปัญหาเรื่องการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

แม่พิมพ์โลหะ จะผลิตโดยใช้เหล็กกล้า, อะลูมิเนียมและสังกะสีอัลลอยด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนทานและสามารถนำชิ้นงานออกได้ง่าย

แม่พิมพ์แบบเหล็กกล้า ใช้ในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ โดยมีกำลังการผลิตประมาณ 100,000 - 200,000 ครั้ง

แม่พิมพ์แบบสังกะสีอัลลอยด์ จะมีน้ำหนักมาก และเนื่องจากมีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยทั่วไปจะมีท่อสำหรับถ่ายเทความร้อนหล่อแม่พิมพ์ไว้ วัสดุนี้นี้จะสามารถนำชิ้นงานออกและตกแต่งชิ้นงานง่าย อายุการใช้งานมากกว่า 50,000 ครั้ง

2.6.2.2 การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)

การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับในกระบวนการ RIM ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานสูงและสามารถแกะออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยแม่พิมพ์ทั้งสองส่วนจะมีท่อซึ่งใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากของเหลว ปกติจะใช้น้ำ กระบวนการนี้โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50-70 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้, ปริมาณของของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อน และค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์ สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส อาจจะใช้ในกระบวนการผลิตพอลิยูเรีย โดยวิธีการ RIM นอกจากนั้นสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการคุณภาพของพื้นผิวที่สูง จะถูกผลิตโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีการ

ควบคุมอุณหภูมิในช่วง 40-50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวของแม่พิมพ์ ควรจะมีความสม่ำเสมอ ความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 2 องศาเซลเซียส กระบวนการ RIM จะมีการคายความร้อน ซึ่งปกติจะเกิดความร้อนประมาณ 50 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของสาร การหล่อเย็นแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการรวมกันของความร้อน (Hot spot) และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ จะส่งผลต่อเวลาในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demold time) และอัตราการผลิต

2.6.2.3 การระบายอากาศในแม่พิมพ์ (Mold venting)

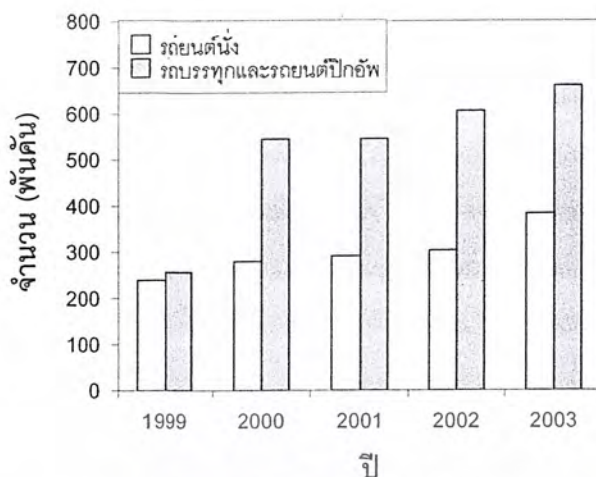
การมีระบบระบายอากาศในแม่พิมพ์ อย่างเพียงพอเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะได้อากาศภายในแม่พิมพ์ออกขณะทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เวลาในการฉีด จะเปลี่ยนจากประมาณ 1 วินาที หรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เวลาในการฉีดโดยปกติ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1-2 วินาที แม่พิมพ์จะมีช่องทางระบายอากาศอยู่ที่จุดสูงสุด ซึ่งจะห่างจากช่องที่ทำการฉีด วิธีการนี้ จะมีกรถ่ายเทของอากาศอย่างเพียงพอ เพื่อหลีกเลี่ยงความดันอากาศที่มากเกินไปภายในแม่พิมพ์และลดการล้นของโฟมที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยานี้ เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน พอลิเมอร์จะมีการขยายตัวขึ้นไปตามแนวของแม่พิมพ์ สำหรับบางชิ้นส่วน อาจจะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยใช้การอัดอากาศที่หัวฉีด ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถ จะใช้กับงานที่ต้องการพื้นผิวที่มีคุณภาพและอาจจะต้องใช้ช่องระบายอากาศขนาดใหญ่ ทางแก้ไข คือ การทำช่องว่าง (Cavity) ขึ้นภายในแม่พิมพ์ และจึงทำการตกแต่งชิ้นงานภายหลังการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ วิธีนี้จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

2.6.2.4 การหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mold release)

สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mold release agent or Parting agent) สำหรับการฉีดขึ้นรูป เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดกับผิวของแม่พิมพ์ นอกจากนั้น ยังช่วยป้องกันน้ำและความชื้น ไม่ให้เข้าทำปฏิกิริยา วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการใช้การหล่อลื่นแม่พิมพ์ คือ การพ่นลงบนพื้นผิวของแม่พิมพ์

2.7 กระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์

จากแผนการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ พบว่าการพัฒนาของอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีการขยายตัวสูงขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่มียอดการผลิตเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละปี ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.10 ปริมาณการผลิตรถยนต์นั่ง, รถบรรทุกและรถยนต์ปิกอัพในแต่ละปี [1]

จากผลดังกล่าว อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนประกอบของยานยนต์ เช่น พวงมาลัย, ด้ามจับเกียร์, แผงคอนโซล, อุปกรณ์ตกแต่งภายนอกและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ ในห้องโดยสาร เป็นต้น จำเป็นที่ต้องพัฒนาระบบการผลิตให้ทันสมัยและทันต่อความต้องการของตลาด

สำหรับกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม โดยทั่วไปสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 5 หน่วยหลัก คือ

1) หน่วยการม้วนวงเหล็ก (Ring)

หน่วยการม้วนวงเหล็ก จะทำหน้าที่ในการม้วนวงเหล็ก, ตัดและเชื่อมเหล็กเส้นให้เป็นวงพวงมาลัยรถยนต์ (Ring) โดยเหล็กเส้นที่จะใช้ 2 ลักษณะ คือ เหล็กเส้นกลางและเหล็กเส้นตัน

2) หน่วยการขึ้นรูปเฟรมพวงมาลัยรถยนต์ (Armature)

หน่วยนี้มีหน้าที่ในการนำวงเหล็กมาทำการเชื่อมชิ้นส่วนอะไหล่ต่างๆ เช่น Boss, Boss plate เป็นต้น โดยใช้เครื่องจักร (Robot) ทำการเชื่อม เป็นเฟรมพวงมาลัยรถยนต์

3) หน่วยการล้างและชุบขาว

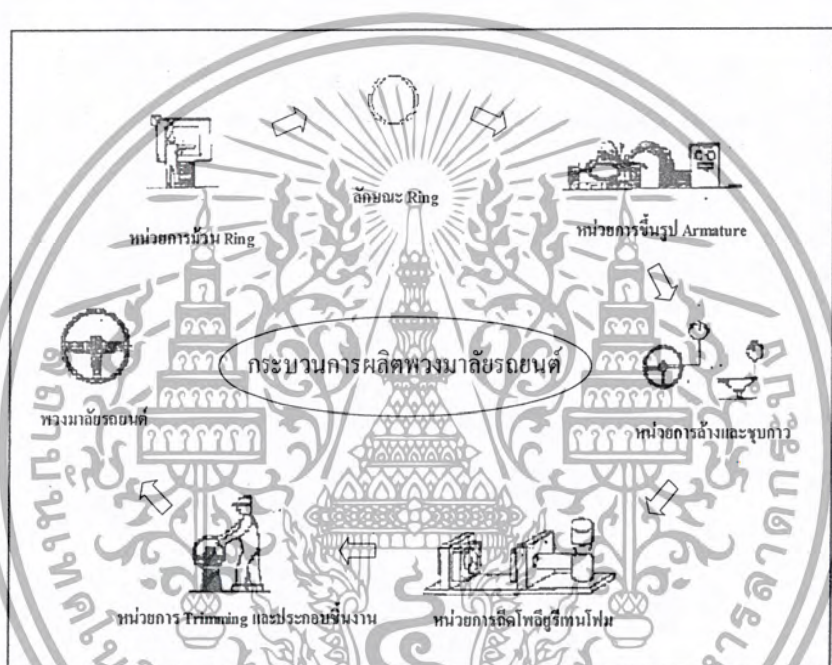
หน่วยการล้างและชุบขาว จะทำหน้าที่นำเฟรมพวงมาลัยรถยนต์ที่ผ่านการเชื่อม มาเข้าเครื่องล้างเฟรม เพื่อทำความสะอาดคราบสนิม ผุนโลหะจากการเชื่อม ตลอดจนสิ่งสกปรกต่างๆ จากนั้น นำเฟรมพวงมาลัยรถยนต์มาทำการชุบขาว เพื่อช่วยในการติดเกาะระหว่างเหล็กกับพอลิยูรีเทนโฟม และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 1-2 ชั่วโมง

4) หน่วยการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม

หน่วยการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม จะมีการใช้สารเคมีหลัก 2 ชนิด คือ ไอโซไซยานเตและพอลิฮอลมาทำปฏิกิริยากันที่บริเวณหัวฉีด เกิดเป็นพอลิยูรีเทนโฟมที่พร้อมสำหรับการฉีดด้วยความดันสูงลงในแม่พิมพ์

5) หน่วยการตกแต่ง (Trimming) และประกอบชิ้นงาน

ชิ้นงานพวงมาลัยรถยนต์ที่ผ่านการฉีดโพลียูรีเทนโฟมเรียบร้อยแล้ว จะถูกส่งมายังหน่วยนี้เพื่อทำการตัดครีบกและตกแต่งชิ้นงาน รวมทั้งจะมีการประกอบชิ้นงานพลาสติกอื่นๆ เช่น ส่วนของแดรกรยนต์ เป็นต้น ภายหลังจากผ่านขั้นตอนการประกอบแล้ว จะได้พวงมาลัยรถยนต์ที่เรียบร้อยแล้ว พร้อมรอการจัดจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.11 แผนภาพของกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ไดเฟนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate, MDI) ชื่อทางการค้า Suprasec 2511 isocyanate เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 1.55 พอยส์ (poise) และความหนาแน่น 1.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.2 พอลิเอเทอร์ พอลิออล (Polyether polyol) ชื่อทางการค้า Daltorim JW 89140 เป็นของเหลวสีขาว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 10 พอยส์ และความหนาแน่น 1.025 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.4 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 12 ท่อ

3.2.2 ขดลวดให้ความร้อน (Tubular heater) ทำจากสแตนเลส 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาวท่อ 3 เมตร จำนวนวัตต์ 3000 วัตต์

3.2.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบหัวเข็ม ชนิดเค (Type K) มีค่า Sheath Outer Diameter 1.6 มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิใช้งาน -220 ถึง 1370 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ตัว

3.2.4 จุกยาง เบอร์ 16 จำนวน 5 ชิ้น

3.2.5 ชุดขาตั้งและแขนจับ

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

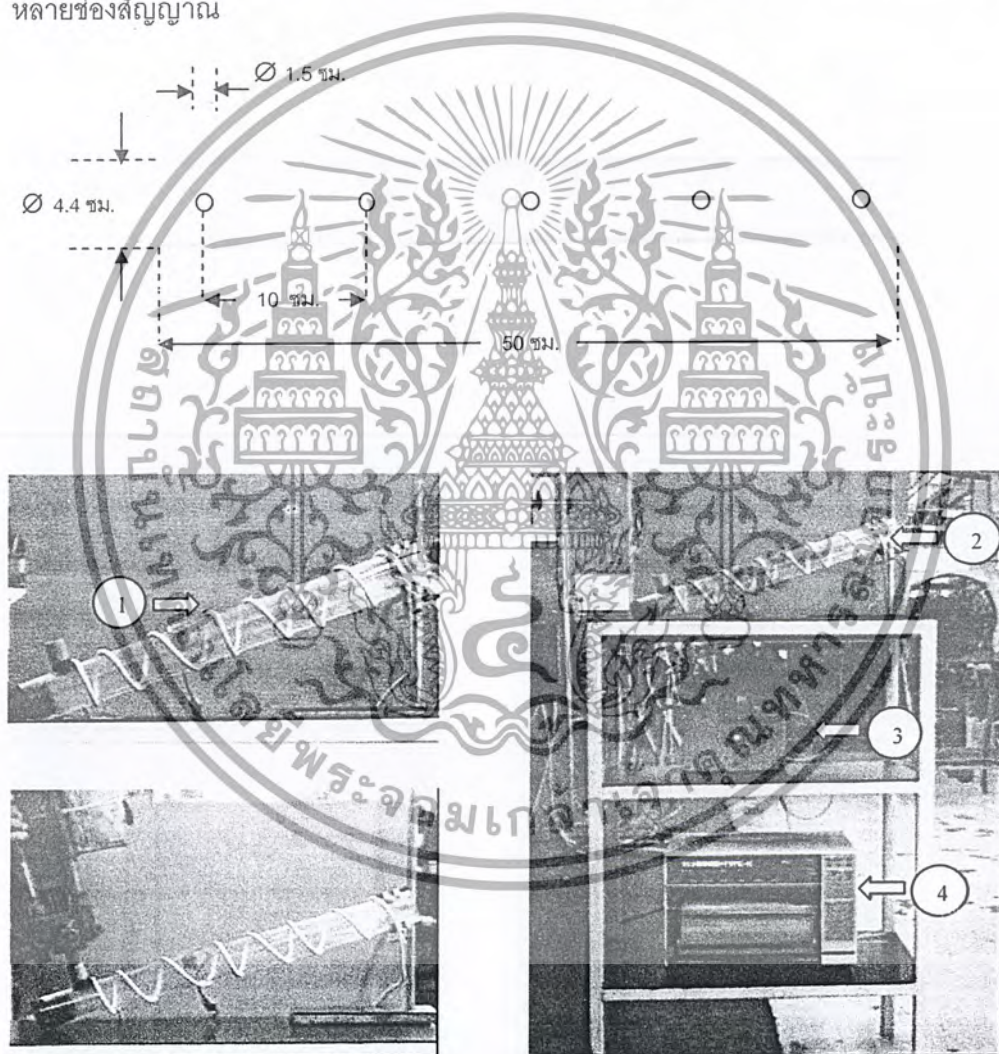
อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องฉีดโฟม	Canon; A-system 40
เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ (Recorder)	Yokogawa; HR-1300
เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Densimeter)	Alfamirage Co.,Ltd; MD-200S
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)	LEO Electron Microscopy Ltd; 1455 VP
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	-
กล้องวิดีโอแบบดิจิทัล (Digital Video Camera)	-
เวอร์เนียร์คาลิเปอร์	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 การออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการประชุมร่วมกับทางโรงงาน ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.4 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร ที่ทำการต่อท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตำแหน่งในการฉีดโฟม และทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล โดยทำการเจาะท่อ ณ จุดขีดเป็นจุดเริ่มต้น (0 เซนติเมตร) และเจาะจุดต่อไปห่างจากจุดเริ่มไปตามแนวท่อเป็นระยะทาง 10, 20, 30 , 40 เซนติเมตรตามลำดับ จากนั้นพันรอบท่ออะคริลิกด้วยขดลวดให้ความร้อน ซึ่งต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิและเครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง (1) ขดลวดให้ความร้อน (2) แม่พิมพ์โปร่งใส (3) ชุดควบคุมอุณหภูมิ และ (4) เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การกำหนดค่าต่างๆ ของเครื่องฉีดพอลิยูรีเทนโฟม

เครื่องฉีดโฟม จะทำงานโดยการอัดความดัน เพื่อทำฉีดสารเคมีผสมกันที่ตำแหน่งหัวฉีด โดยปกติ เครื่องจะฉีดไอโซไซยานเตในอัตรา 48 ± 20 กรัมต่อวินาที, ฉีดพอลิอล ในอัตรา 80 ± 20 กรัมต่อวินาที และฉีดสีในอัตรา 3.3 ± 2 กรัมต่อวินาที

ขั้นตอนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ในแต่ละรุ่น จะทำการกำหนดเวลาในการฉีด (Injection time) ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 3-4 วินาที และกำหนดเวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาต่อครั้ง (Demold time) เท่ากับ 3 นาที โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนลงในแม่พิมพ์ที่เคียง 20 องศา กับแนวระดับ และควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของกระบวนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์

รุ่น	POLY	ISO	Time Injection (sec)	Demold Time (min)	Toner		Release (g/shot)
					code No	weight(g/s)	
203	80 ± 20	48 ± 20	3.4 ± 1	3 ± 0.5	PU N1112	3.3 ± 2	70 ± 10
605	80 ± 20	48 ± 20	4.2 ± 1	3 ± 0.5	PU N5565	3.3 ± 2	70 ± 10
903	80 ± 20	48 ± 20	3.2 ± 1	3 ± 0.5	PU N1082	3.3 ± 2	70 ± 10

ในการทดลองนี้ กำหนดเวลาในการฉีดที่ 0.6 วินาที ซึ่งจะได้ปริมาณของไอโซไซยานเต และพอลิอล เท่ากับ 28.8 ± 20 และ 48 ± 20 กรัมตามลำดับ และใช้เวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาต่อครั้ง เท่ากับ 3 นาที โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนลงในแม่พิมพ์ที่เคียง 20 องศา กับแนวระดับ แต่ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส ดังสภาวะต่อไปนี้

- สภาวะที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)
- สภาวะที่ 2 ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส
- สภาวะที่ 3 ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 80 องศาเซลเซียส

3.3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม

- จัดเตรียมแม่พิมพ์และอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1
- ทำการปรับค่าเวลาในการฉีดโฟมที่ 0.6 วินาที
- พ่นน้ำยาหล่อลื่น (Mold release) ที่ผิวแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์
- เปิดเครื่องบันทึกผลและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์

ที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)

- บันทึกภาพและค่าของอุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ
- กำหนดเวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาเท่ากับ 3 นาที เพื่อรอให้ปฏิกิริยา

เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

- เก็บชิ้นงานในที่แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างของเนื้อโฟมเกิดความเสถียรแล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
- ทำการทดลองซ้ำตามวิธีข้างต้น โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์เป็น 55 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

สมบัติต่างๆ ที่ทดสอบ มีดังนี้

ก) สันฐานวิทยา ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ส่องชิ้นโฟมที่ได้จากการฉีดในแต่ละสภาวะ ที่ระยะของการไหล 0, 10, 20, 30, 40 เซนติเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซในเนื้อโฟม

ข) ความหนาแน่น ใช้เครื่องวัดความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส (Electronic densimeter ; MD-200S) โดยอาศัยหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes method) (ขั้นตอนการหาค่า แสดงไว้ในภาคผนวก ข)

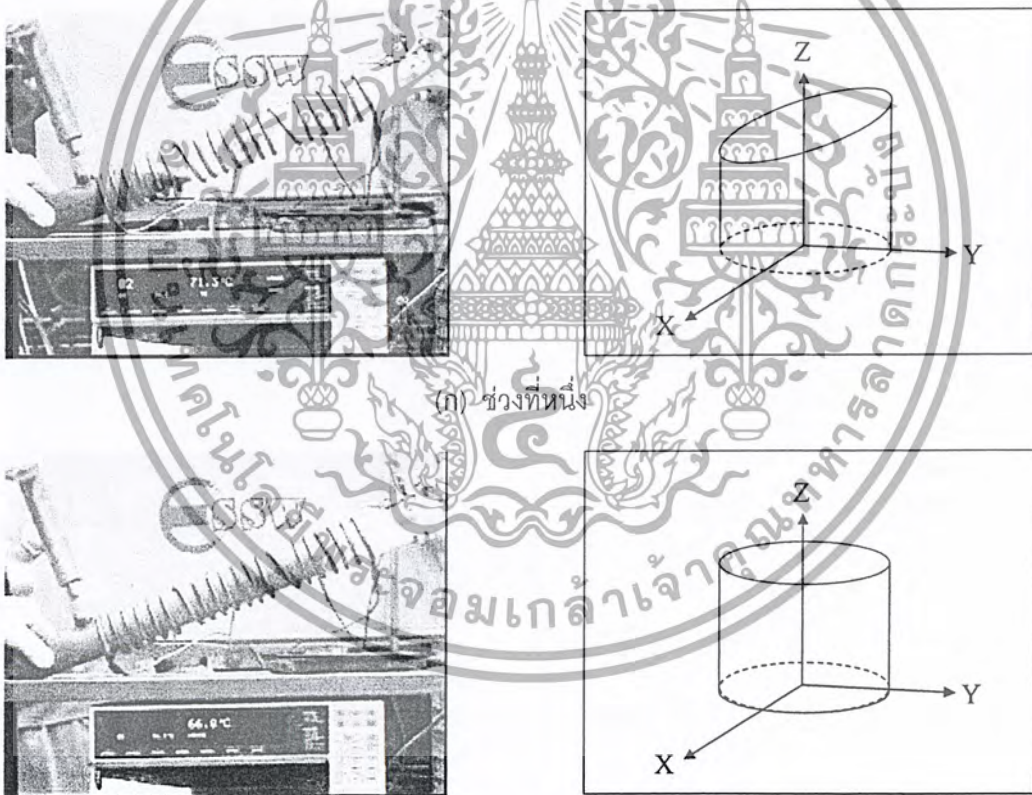
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของโฟม

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม ปัญหาสำคัญ 2 ประการ คือ งานฉีดที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ทำให้เกิดรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์และการฉีดเนื้อโฟมมากเกินไปจนล้นแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเศษโฟมจากรูล้นของแม่พิมพ์เป็นจำนวนมาก

ในงานวิจัยขั้นนี้ได้ทำการทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์แบบโปร่งใส เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟม จากการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า ลักษณะการไหลของโฟมที่เกิดขึ้นนั้น แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกการไหลของโฟมจะยังไม่สม่ำเสมอ สามารถสังเกตรูปทรงของโฟมเป็นรูปทรงกระบอกตัด และในช่วงที่สอง การไหลจะเป็นแบบราบเรียบ (Plug flow) สามารถสังเกตรูปทรงของโฟมเป็นรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 4.1



(ข) ช่วงที่สอง

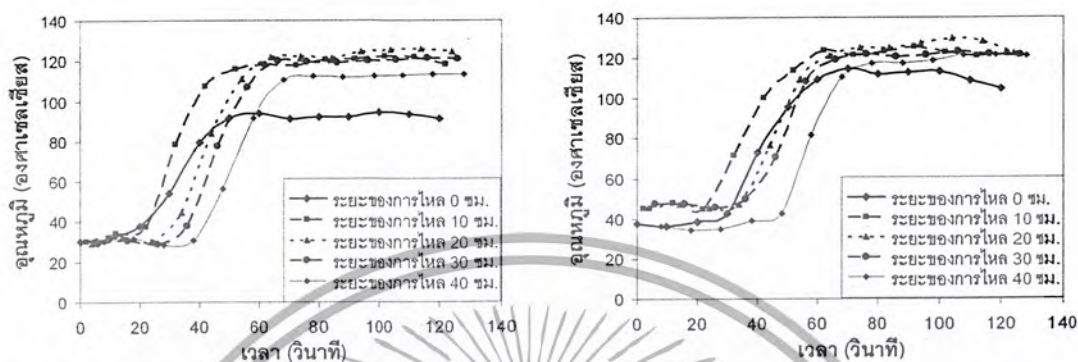
รูปที่ 4.1 การไหลของโฟมและแบบจำลองในการหาปริมาตรในช่วงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาค่าอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิเริ่มต้น 30, 55 และ 80 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 120 องศาเซลเซียส



(ก) อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

(ข) อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ระยะเวลาต่างๆ ของการไหล ระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและมีการคายความร้อนในปริมาณมาก โดยที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแม่พิมพ์มีลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่จะมีช่วงเวลาเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของพอลิยูรีเทนโฟมผ่านจากตำแหน่งจุดฉีด (0 เซนติเมตร) ไปยังตำแหน่งถัดไปตามแนวของแม่พิมพ์

จากผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่าตลอดความร้อนทำหน้าที่หล่อเย็นพื้นผิวของแม่พิมพ์ โดยต้องการควบคุมการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ เพื่อให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์มีความสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟมที่มีคุณภาพ เช่น ชิ้นงานมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ, ระดับความแข็งตรงตามต้องการ เป็นต้น

จากการเปรียบเทียบรูปที่ 4.2 พบว่า อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ระยะเวลาไหลต่างๆ ในช่วงเวลาดังแต่ 60 วินาทีหลังจากทำการฉีดโฟมของสภาวะการทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์เท่ากับ 55 องศาเซลเซียสนั้น มีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่ แตกต่างจากสภาวะที่ไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวและสภาวะที่ควบคุมพื้นผิวของแม่พิมพ์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีอุณหภูมิของ ณ ระยะเวลาไหลต่างๆ แตกต่างกันอย่างชัดเจน

4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะการไหลของโฟมและการเกิดโฟม

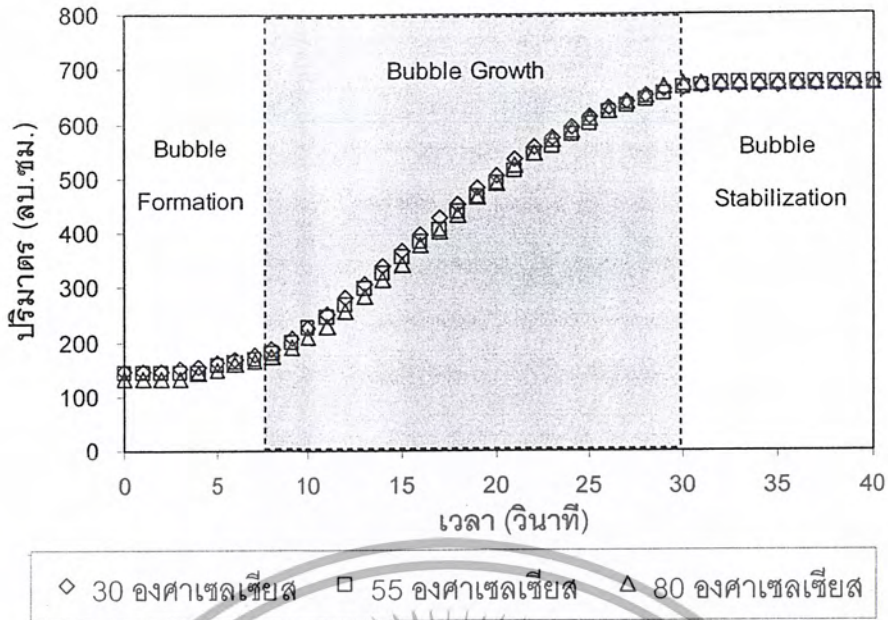
จากผลการทดลอง สามารถคำนวณหาปริมาตรของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น, อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซ และระยะของการไหลของโฟมในช่วงเวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 , รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 (การหาปริมาตรของพอลิยูรีเทนโฟม สามารถหาได้โดยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีการอินทิกรัลสามชั้นในระบบพิกัดฉาก "Triple Integral in Rectangular Coordinate" ในภาคผนวก ค)

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ภายหลังจากการฉีดพอลิยูรีเทน โฟมนั้น ช่วงแรกพอลิยูรีเทน จะมีสถานะเป็นของเหลว ปริมาตรโดยเฉลี่ยเท่ากับ 142 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน พอลิยูรีเทนจะเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นโฟม และมีปริมาตรสุดท้ายโดยเฉลี่ย เท่ากับ 673 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงแปลงปริมาตรของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น และสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของฟองก๊าซออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 Bubble Formation เป็นช่วงของการเกิดฟองก๊าซเริ่มต้น โดยที่ปริมาตรของฟองก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ช่วงที่ 2 Bubble Growth เป็นช่วงการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ โดยในช่วงนี้ ปริมาตรของฟองก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

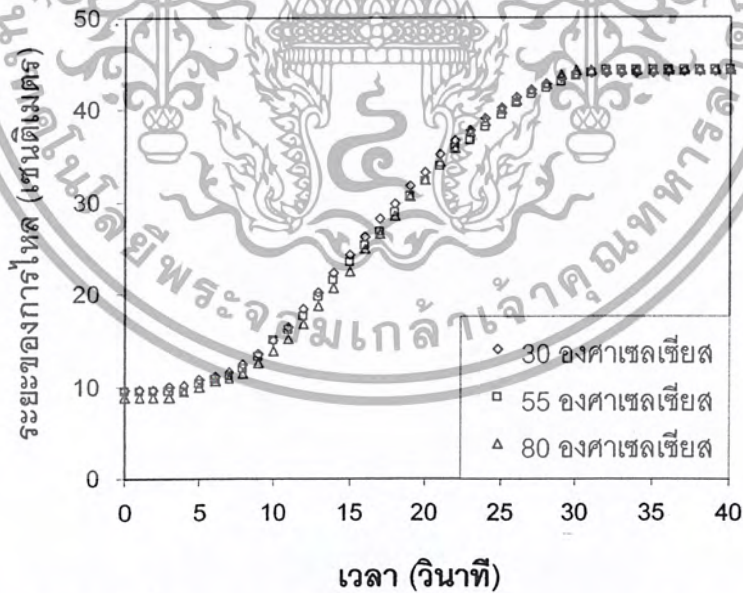
ช่วงที่ 3 Bubble Stabilization เป็นช่วงการคงสภาพของฟองก๊าซ ปริมาตรของฟองก๊าซเริ่มคงที่



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของฟอลิยูรีเทนโฟม ณ ช่วงเวลาต่างๆ

จากผลการทดลอง สามารถหาความสัมพันธ์และระยะเวลาไหลต่างๆ ของโฟมกับเวลา

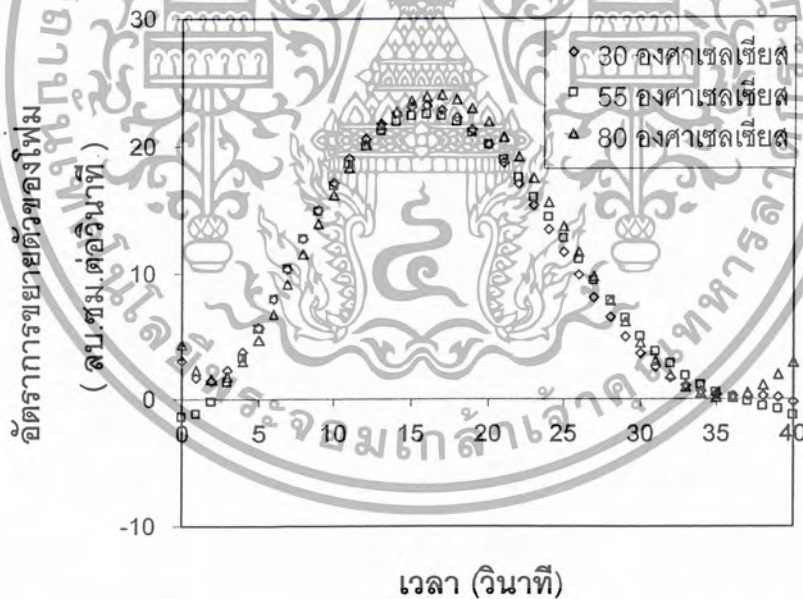
ดังรูป 4.4 เพื่อช่วยในการหาค่าแทนระยะเวลาไหลของโฟม ที่มีอัตราการขยายตัวของโฟมสูงสุด



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่อระยะเวลาของการไหลของฟอลิยูรีเทนโฟม ณ ช่วงเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงอัตราการขยายของฟองก๊าซต่อเวลา ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างๆ พบว่า แนวโน้มของอัตราการขยายของทุกๆ สภาวะมีลักษณะเดียวกัน คือ เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงหลัง เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน จะเกิดฟองก๊าซขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งในช่วงแรกของการเกิดพอลิเมอไรเซชันนั้น เนื้อโพนยังไม่ได้สร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเก็บกักก๊าซไว้ได้ เมื่อก๊าซได้รับความร้อนจึงเกิดการขยายตัวได้ดี ทำให้ค่าอัตราการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการขยายตัวสูงสุด โดยเฉลี่ยเท่ากับ 23.20 ลบ.ซม.ต่อวินาที ณ เวลา 16 วินาที แต่เมื่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันดำเนินต่อไป โครงสร้างของพอลิเมอร์จะมีความเสถียรและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซขยายตัวไม่ได้หรือได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซลดลง และเมื่อทราบเวลาที่ม้ออัตราการขยายตัวสูงสุด ตามรูปที่ 4.5 สามารถคำนวณหาระยะการไหลของโพน ณ จุดที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด โดยความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณได้ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งข้อมูลที่ได้จะช่วยให้การออกแบบรูปล้นและช่องใส่อากาศในแม่พิมพ์ สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียพอลิยูรีเทนในระหว่างการฉีดได้ กล่าวคือ ตำแหน่งของรูปล้นไม่ควรอยู่ตรงกับระยะการไหลของโพน ในช่วงเวลาประมาณ 16 วินาทีหลังจากการฉีด เพราะในช่วงเวลาดังกล่าว พอลิยูรีเทนโพน เกิดการขยายตัวสูงสุด จะล้นออกในช่องใส่อากาศและรูปล้นมากกว่าการไหลในแม่พิมพ์



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ต่ออัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโพน ณ ช่วงเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

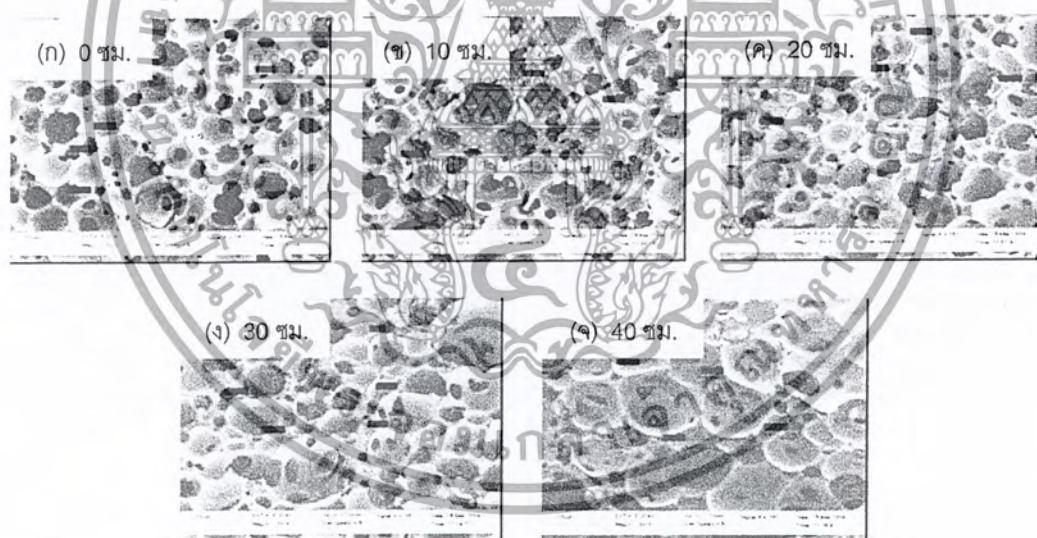
ตารางที่ 4.1 ระยะการไหลของโฟม ณ จุดที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด

อุณหภูมิ (°C)	ระยะการไหลของโฟม (cm) ณ จุดที่มีอัตราการขยายตัว
30	26.16
55	25.29
80	26.48

4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเนื้อโฟม

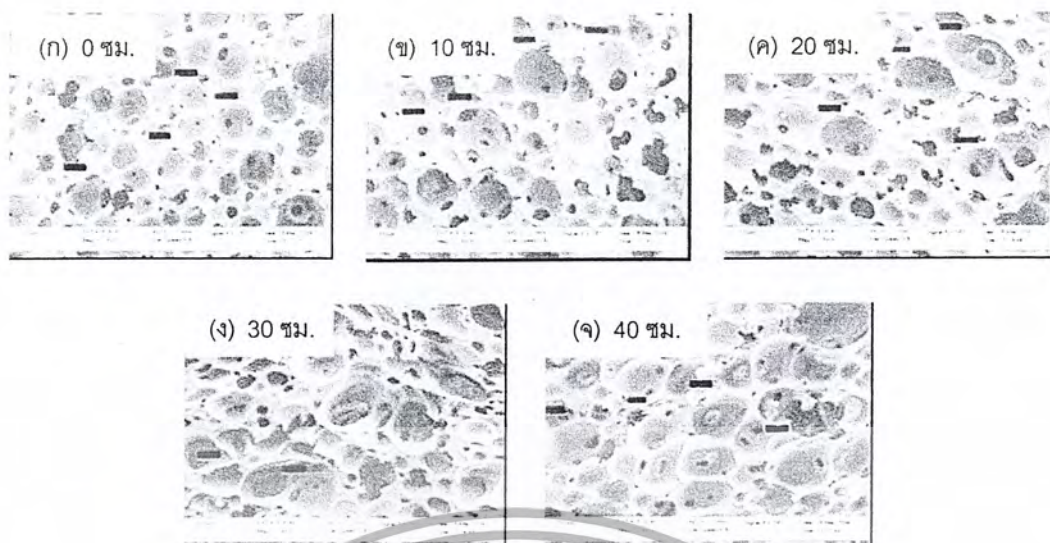
จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ส่องชิ้นโฟม พบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อพอลิยูรีเทนโฟมมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดและมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากฟองก๊าซขนาดต่างๆ กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเนื้อโฟม

จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ ณ ระยะทางการไหลของโฟม 0, 10, 20, 30 และ 40 เซนติเมตร แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

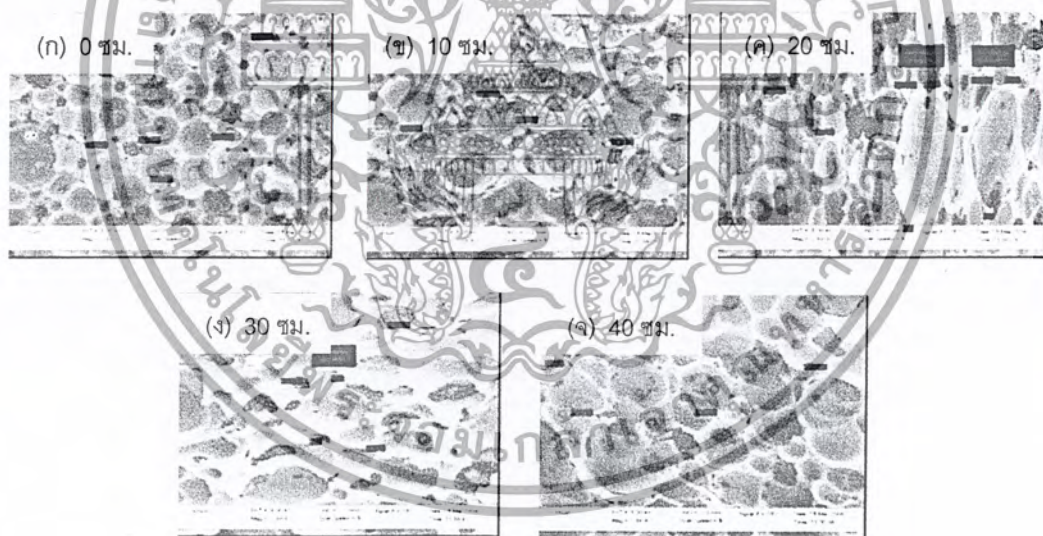


รูปที่ 4.6 SEM micrographs ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะการไหลต่างๆ ของโฟม ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 SEM micrographs ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะการไหลต่างๆ ของโฟม ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส



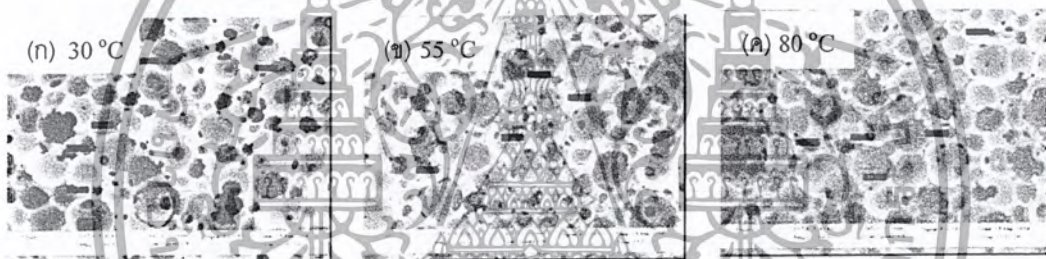
รูปที่ 4.8 SEM micrographs ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งของระยะการไหลต่างๆ ของโฟม ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

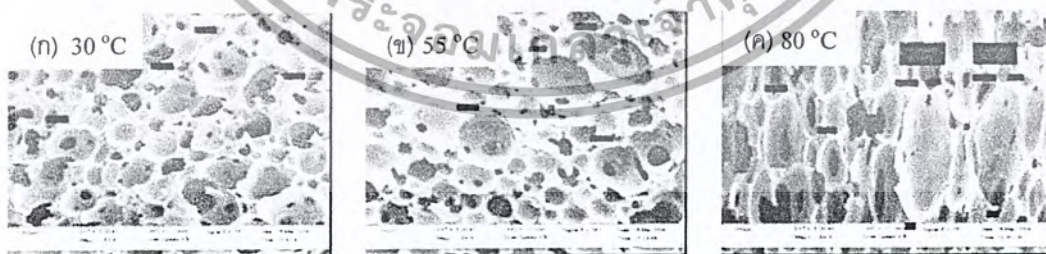
ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อขนาดของฟองก๊าซที่ระยะต่างๆ ของการไหล

อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร) ที่ระยะทางการไหลของโฟม (เซนติเมตร)				
	0	10	20	30	40
30	258	311	315	365	412
55	253	367	371	410	412
80	261	330	386	326	369

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเนื้อโฟม ณ ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้น



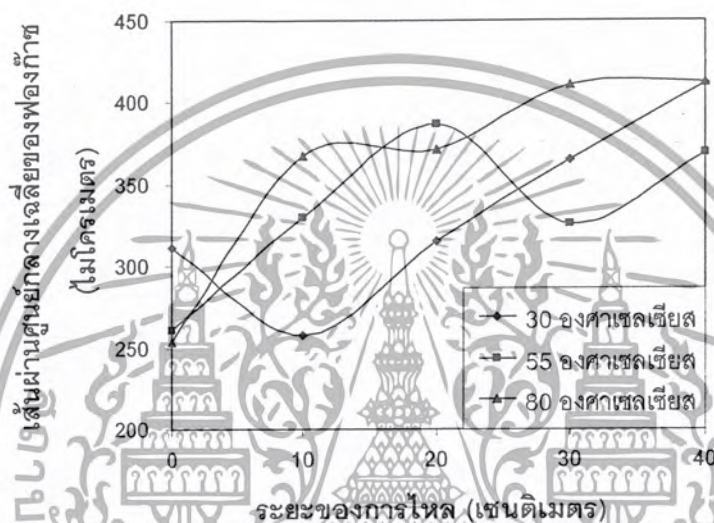
รูปที่ 4.9 SEM micrographs ขนาดกำลังขยาย 50 เท่า ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งระยะการไหล 0 เซนติเมตร ของสภาวะการทดลองต่างๆ



รูปที่ 4.10 SEM micrographs ขนาดกำลังขยาย 50 เท่า ของพอลิยูรีเทนโฟม ณ ตำแหน่งระยะการไหล 20 เซนติเมตร ของสภาวะการทดลองต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

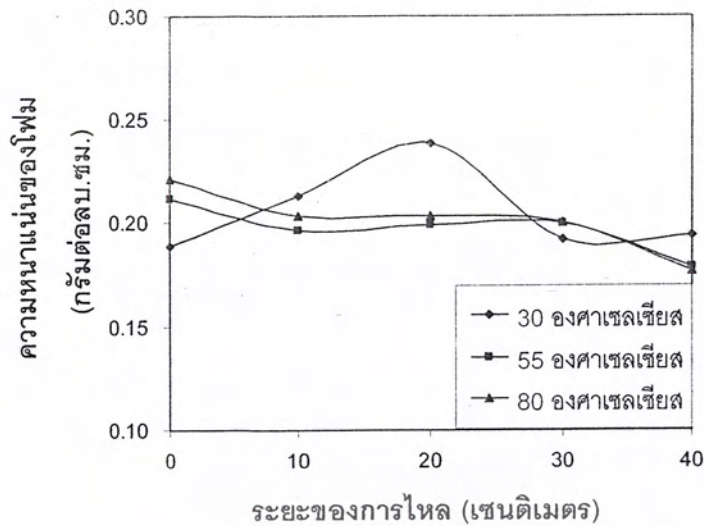
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่ามีฟองก๊าซเกิดในเนื้อพอลิยูรีเทนโฟม โดยที่ตำแหน่งต่างๆ ของเนื้อโฟม จะมีขนาดของฟองก๊าซแตกต่างกัน นั่นคือ ณ จุดที่ตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น ฟองก๊าซจะมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้ ที่ตำแหน่งเริ่มแรกของการฉีด (ตำแหน่งเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา) จะเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กจำนวนมากในเนื้อพอลิเมอร์ เมื่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันดำเนินต่อไป (พอลิเมอร์โฟมไหลไปที่ตำแหน่งถัดไป) จะคายความร้อนออกจากระบบ ซึ่งปริมาณความร้อนนี้ จะทำให้ฟองก๊าซเกิดการขยายตัวขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกันของฟองก๊าซ เกิดเป็นฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ ณ ระยะของการไหลต่างๆ

4.2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนาแน่นของเนื้อโฟม

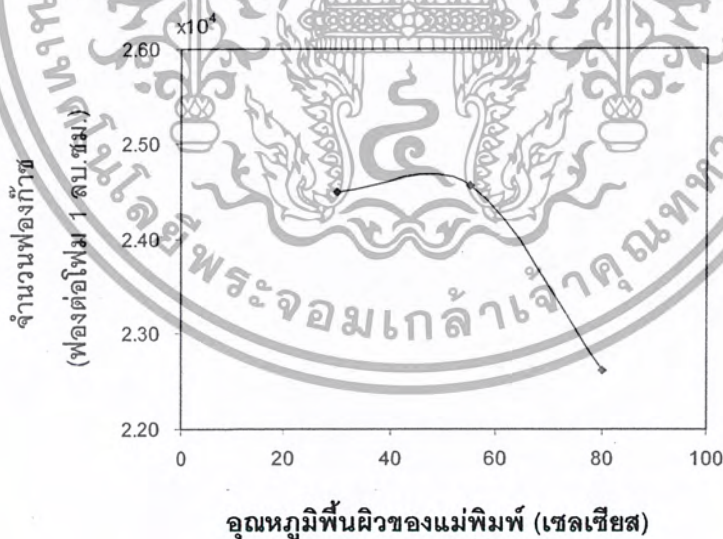
จากรูปที่ 4.12 พบว่า เนื้อโฟมที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นของโฟมที่ตำแหน่งต่างๆ จะไม่คงที่ โดยที่ตำแหน่ง 20 เซนติเมตรของเนื้อโฟม จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด ส่วนเนื้อโฟมที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ เท่ากับ 55 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างคงที่และสม่ำเสมอ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่มีต่อความหนาแน่นของโฟม ณ ระยะของการไหลต่างๆ

4.2.5 การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 สามารถหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซและค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมตามสภาวะการทดลองต่างๆ ได้ เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม จากสมการ (2.1) แสดงผลได้ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์กับจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างๆ สามารถสรุปคุณลักษณะของพอลิยูรีเทนโฟมที่เตรียมได้จากแม่พิมพ์โปร่งใสได้ ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งข้อมูลจากการทดลองนี้ จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายการขยายตัวของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพอลิยูรีเทนโฟม

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมจากผลการทดลองจัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

สมบัติต่างๆ	หน่วย	อุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)		
		30	55	80
ปริมาตรของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น	ลูกบาศก์เซนติเมตร	524	530	541
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ	ไมโครเมตร	332	334	362
ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟม	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.205	0.197	0.199
จำนวนฟองก๊าซ	ฟองต่อโฟม 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร	24490	24567	22621
ปริมาตรของก๊าซต่อ 1 ฟอง	ลูกบาศก์เซนติเมตร	3.19×10^{-5}	3.20×10^{-5}	3.55×10^{-5}

หมายเหตุ * : การคำนวณหาค่าจำนวนฟองก๊าซ แสดงไว้ในภาคผนวก

โดยในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ จะอ้างอิงความสัมพันธ์ของสมการก๊าซอุดมคติ

$$P(t)V(t) = n_{co_2}(t)RT(t)$$

ซึ่งจะต้องคำนวณค่า ดังต่อไปนี้

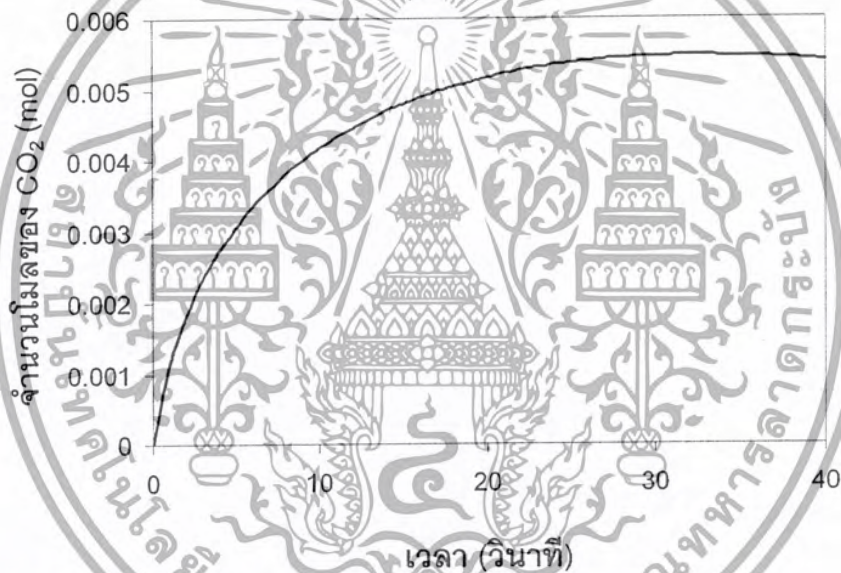
- 1) การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นกับเวลา ; $n_{co_2}(t)$
- 2) การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา; $T(t)$
- 3) การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับเวลา; $P(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นกับเวลา ; $n_{CO_2}(t)$

จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและเป็นฟังก์ชันกับเวลานั้น ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Ohshima และคณะ [3] ที่ได้ทำการทดลองศึกษาการทำปฏิกิริยาของพอลิออลและไอโซไซยาเนต เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและวัดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ตามรูป 5.1 และสามารถหาความสัมพันธ์ ได้ดังสมการ

$$n_{CO_2} = (-8.67 \times 10^{-9})t^4 + (8.81 \times 10^{-7})t^3 - (3.40 \times 10^{-5})t^2 + (6.25 \times 10^{-4})t + (5.98 \times 10^{-4})$$



รูปที่ 5.1 จำนวนโมลของก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ

5.2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา; $T(t)$

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 เพื่อทำการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 0, 10, 20, 30 และ 40 เซนติเมตรภายในแม่พิมพ์โปร่งใส ณ ช่วงเวลาต่างๆ และใช้โปรแกรมพอลิแมท (Polymath®) และโปรแกรมเอ็กเซลล์ (Excel®) ช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ในลักษณะของสมการพหุนาม (Polynomial equation) โดยทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และทำการสร้างเส้นแนวโน้มแบบสมการพหุนาม ซึ่งแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.2

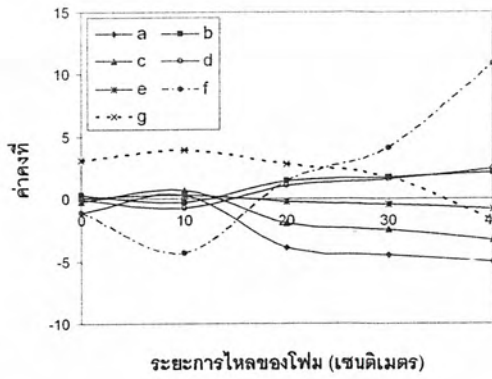
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของสมการพหุนามระหว่างอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์กับเวลา ณ ช่วงระยะเวลาไหลต่างๆ ของโม่

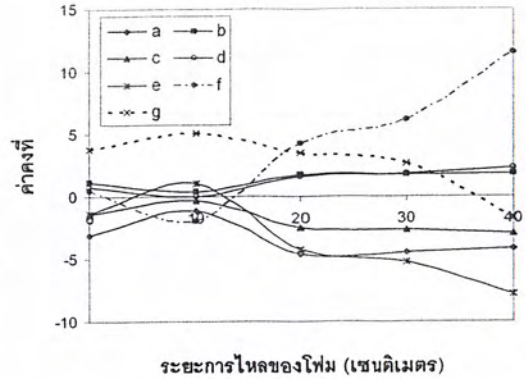
อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	$T(x,t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g$, t : เวลา (วินาที)							
สภาวะที่ 1	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส							
X : ระยะการไหลของโม่ (เซนติเมตร)	$a \times 10^9$	$b \times 10^6$	$c \times 10^4$	$d \times 10^2$	$e \times 10$	f	$g \times 10^{-1}$	R^2
0	-1.1066	0.3096	-0.2316	-0.0423	0.0920	-1.0888	3.1247	1.00
10	0.3017	-0.2664	0.6844	-0.7470	0.3506	-4.3590	3.9510	1.00
20	-3.9153	1.4434	-1.9319	1.0996	-0.2249	1.4719	2.7929	1.00
30	-4.4761	1.7357	-2.4861	1.5773	-0.4101	4.0606	1.7592	1.00
40	-5.0657	2.1020	-3.2946	2.3905	-0.7873	10.8577	-1.7039	1.00
สภาวะที่ 2	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส							
X : ระยะการไหลของโม่ (เซนติเมตร)	$a \times 10^9$	$b \times 10^6$	$c \times 10^4$	$d \times 10^2$	$e \times 10$	f	$g \times 10^{-1}$	R^2
0	-3.1338	1.1194	-1.4429	0.7730	-1.3359	0.4740	3.7955	1.00
10	-1.1184	0.3424	-0.3006	-0.0119	1.0903	-2.0030	5.0476	1.00
20	-4.6116	1.7662	-2.5155	1.6046	-4.2799	4.2745	3.5186	1.00
30	-4.4324	1.7659	-2.6324	1.7829	-5.2507	6.1191	2.6333	1.00
40	-4.1785	1.7961	-2.9355	2.2398	-7.8389	11.4848	-1.6925	1.00
สภาวะที่ 3	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส							
X : ระยะการไหลของโม่ (เซนติเมตร)	$a \times 10^9$	$b \times 10^6$	$c \times 10^4$	$d \times 10^2$	$e \times 10$	f	$g \times 10^{-1}$	R^2
0	12.8412	-8.6864	22.4074	-27.4207	1.4786	-1.7188	3.7324	1.00
10	17.9694	-11.2375	27.1033	-31.1099	1.6306	-2.2857	7.1731	1.00
20	9.2957	-6.7370	18.6652	-24.3785	1.4399	-2.3610	7.9625	1.00
30	-12.5357	4.8145	-3.6992	-5.7905	0.9089	-2.6728	8.4913	1.00
40	-35.1599	18.2713	-34.0381	26.0680	-0.6121	-0.1142	6.4549	1.00

เมื่อนำค่าคงที่ของสมการพหุนามของทุกๆ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ มาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ เพื่อที่จะได้เทอมของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่เป็นฟังก์ชันเวลาและตำแหน่งระยะการไหล $T(x,t)$ ในแต่ละสภาวะการทดลอง ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 เซลเซียส



(ข) อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 เซลเซียส



(ค) อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 เซลเซียส

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับระยะเวลาไหลของไฟ

กำหนดให้ฟังก์ชันของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์เป็นฟังก์ชันพหุนาม ดังสมการ

$$T(x, t) = a(x)t^6 + b(x)t^5 + c(x)t^4 + d(x)t^3 + e(x)t^2 + f(x)t + g(x) \dots(5.1)$$

ใช้โปรแกรมพอลิแมท (Polymath®) และโปรแกรมเอ็กเซลล์ (Excel®) ช่วยในการคำนวณหาความสัมพันธ์ในลักษณะของสมการพหุนาม (Polynomial equation) และทำการสร้างเส้นแนวโน้มแบบสมการพหุนาม ซึ่งแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.3 และเมื่อกำหนดตำแหน่งระยะเวลาไหลของไฟที่ต้องการศึกษา ซึ่งก็คือ ระยะเวลาไหลของไฟที่มีอัตราการตัวของไฟสูงสุด จะได้ความสัมพันธ์ ดังตารางที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของสมการพหุนามระหว่างค่าคงที่กับระยะการไหลของโคม
ณ สภาวะการทดลองต่างๆ

ค่าคงที่ = $a_1x^4 + b_1x^3 + c_1x^2 + d_1x + e_1$, x : ระยะการไหลของโคม (ซม.)						
สภาวะที่ 1	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส					
ฟังก์ชัน	$a_1 \times 10^5$	$b_1 \times 10^3$	$c_1 \times 10^2$	$d_1 \times 10$	e_1	R^2
$a(x)$	-5.4027	4.7885	-1.3396	10.5565	-1.1066	1.00
$b(x)$	2.1645	-1.9159	5.3755	-4.2520	0.3095	1.00
$c(x)$	3.2961	2.9101	-8.1892	6.5247	-0.2316	1.00
$d(x)$	2.3435	-2.0594	5.8136	-4.6932	-0.0422	1.00
$e(x)$	-0.7529	0.6558	-1.8577	1.5357	0.0920	1.00
$f(x)$	8.2474	-7.0056	19.7943	-16.8837	-1.0887	1.00
$g(x)$	-1.9428	1.5171	-4.1838	-3.6872	3.1247	1.00
สภาวะที่ 2	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส					
ฟังก์ชัน	$a_1 \times 10^5$	$b_1 \times 10^3$	$c_1 \times 10^2$	$d_1 \times 10$	e_1	R^2
$a(x)$	-5.3241	4.7246	-13.2012	11.0243	-3.1338	1.00
$b(x)$	2.1163	-1.8739	5.2406	-4.3553	1.1193	1.00
$c(x)$	-3.2245	2.8439	-7.9531	6.5739	-1.4429	1.00
$d(x)$	2.3152	-2.0290	5.6672	-4.6545	0.7729	1.00
$e(x)$	-7.5886	6.5858	-1.8343	14.9428	-1.3359	1.00
$f(x)$	8.8089	-7.4832	20.6609	-16.5355	0.4740	1.00
$g(x)$	-3.1287	2.4480	-6.5445	5.6613	3.7955	1.00
สภาวะที่ 3	อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส					
ฟังก์ชัน	$a_1 \times 10^5$	$b_1 \times 10^3$	$c_1 \times 10^2$	$d_1 \times 10$	e_1	R^2
$a(x)$	4.8836	-2.8228	-1.8509	9.3136	1.2841	1.00
$b(x)$	-2.1228	1.2652	1.2411	-4.8951	-0.8636	1.00
$c(x)$	2.8100	-1.8180	-3.0798	9.3128	2.2407	1.00
$d(x)$	-0.0091	0.2448	4.4822	-8.4153	-2.7420	1.00
$e(x)$	-2.7162	1.6335	-4.7123	4.5699	1.4786	1.00
$f(x)$	15.9692	-10.7930	23.6565	-20.1293	-1.7188	1.00
$g(x)$	-19.5647	15.7236	-46.7323	67.3726	3.7323	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งที่อัตราการขยายตัวของโฟมมีค่าสูงสุด

สภาวะการทดลอง	$a \times 10^{-10}$	$b \times 10^{-8}$	$c \times 10^{-5}$	$d \times 10^{-2}$	$e \times 10^{-1}$	f	$g \times 10^1$
1) T = 30 °C	-47.40	181	-25.40	1.57	-3.88	3.41	2.20
2) T = 55 °C	-50.50	197	-28.70	1.90	-5.39	5.79	3.05
3) T = 80 °C	-0.38	0.15	0.55	-0.13	1.16	-2.65	8.38

จากตารางที่ 5.4 เมื่อสร้างกราฟหาความสัมพันธ์แบบสมการพหุนามระหว่างค่าคงที่ต่างๆ กับสภาวะการทดลอง (อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์) จะได้ความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g$$

โดยที่

$$a = (4.24 \times 10^{-12}) T_{cond}^2 - (3.72 \times 10^{-10}) T_{cond} + (2.62 \times 10^{-9})$$

$$b = (-1.70 \times 10^{-9}) T_{cond}^2 + (1.51 \times 10^{-7}) T_{cond} - (1.18 \times 10^{-6})$$

$$c = (2.60 \times 10^{-7}) T_{cond}^2 - (2.34 \times 10^{-5}) T_{cond} + (2.15 \times 10^{-4})$$

$$d = (-1.89 \times 10^{-5}) T_{cond}^2 + (1.73 \times 10^{-3}) T_{cond} - (1.94 \times 10^{-2})$$

$$e = (6.44 \times 10^{-4}) T_{cond}^2 - (6.07 \times 10^{-2}) T_{cond} + (8.55 \times 10^{-1})$$

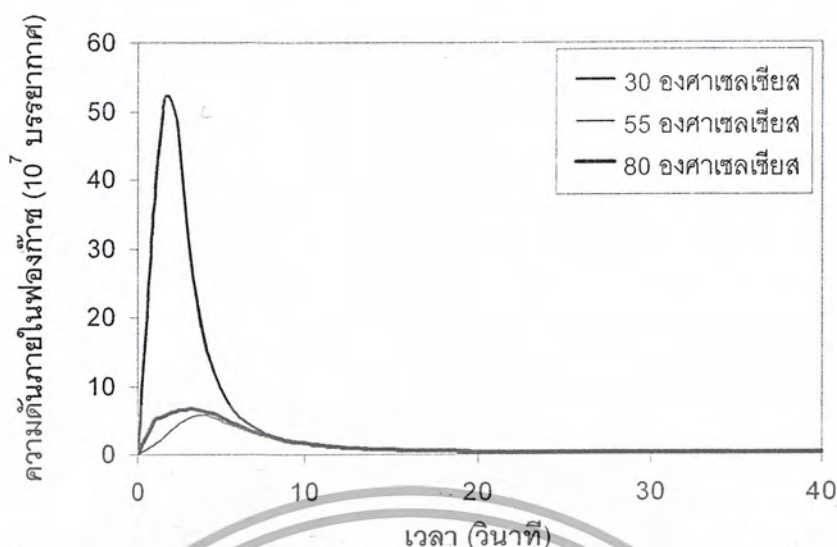
$$f = (-8.65 \times 10^{-3}) T_{cond}^2 + (8.31 \times 10^{-1}) T_{cond} - (1.37 \times 10^{-1})$$

$$g = (3.57 \times 10^{-2}) T_{cond}^2 + (2.70) T_{cond} + (7.08 \times 10^1)$$

5.3 การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับเวลา; $P(t)$

การหาค่าของเทอม $P(t)$ ซึ่งเป็นค่าของความดันภายในของฟองก๊าซที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง ทางคณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีการใช้โปรแกรมพอลิแมท คำนวณค่า $P(t)$ โดยอ้างอิงผลของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และปริมาตรของโฟมที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันภายในฟองก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ

พบว่า ค่าความดันภายในฟองก๊าซในช่วงเริ่มต้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงของการเกิดฟองก๊าซ (Bubble formation) โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะยังไม่เกิดการขยายตัว เนื่องจากค่าความดันภายใน ยังไม่สามารถเอาชนะผลจากแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น จะเกิดก๊าซเพิ่มขึ้นในระบบ เนื่องมาจากการดำเนินต่อไปของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ เซชัน และก๊าซเหล่านั้นจะแพร่เข้าไปในฟองก๊าซ ทำให้ค่าความดันภายในฟองก๊าซมีค่าสูงสุดเพียงพอที่จะเอาชนะผลของแรงตึงผิว ฟองก๊าซจะเริ่มเกิดการขยายตัว (Bubble growth) ทำให้ความดันภายในของฟองก๊าซมีค่าลดลง โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.4

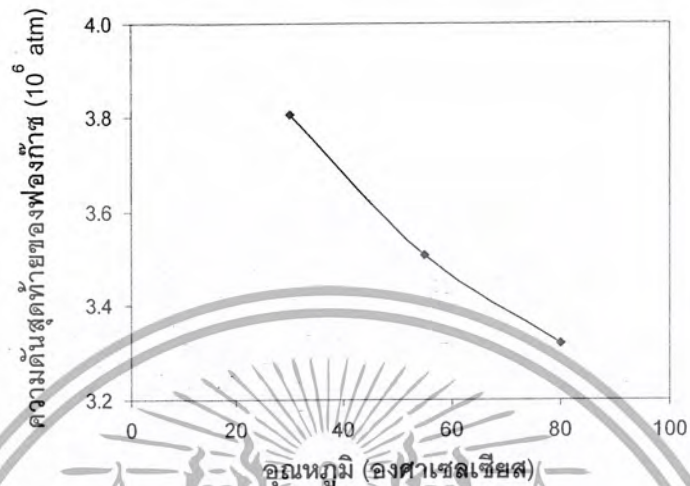
ตารางที่ 5.4 ความดันภายในของฟองก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	เวลา ณ จุดที่ความดัน ภายในฟองก๊าซมีค่าสูงสุด (วินาที)	ความดันสุดท้าย ของฟองก๊าซ (บรรยากาศ; atm)
30	1.64	3.807×10^6
55	3.88	3.510×10^6
80	3.24	3.320×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.4 สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบพหุนามระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ จะได้กราฟ ตามรูปที่ 5.4 ซึ่งมีสัมพันธดังสมการ

$$P = (90.4) T_{cond}^2 - (1.96 \times 10^4) T_{cond} + (4.31 \times 10^6)$$

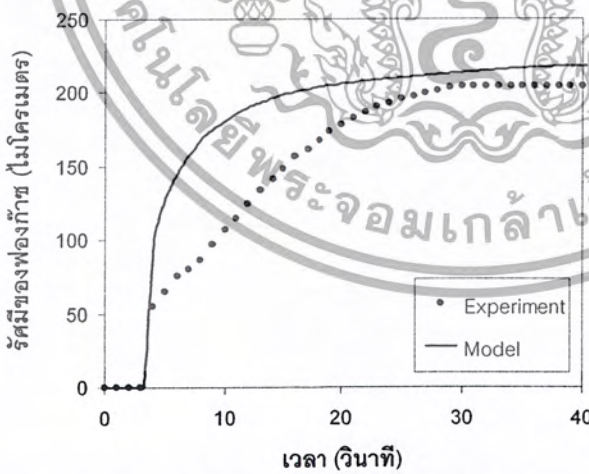
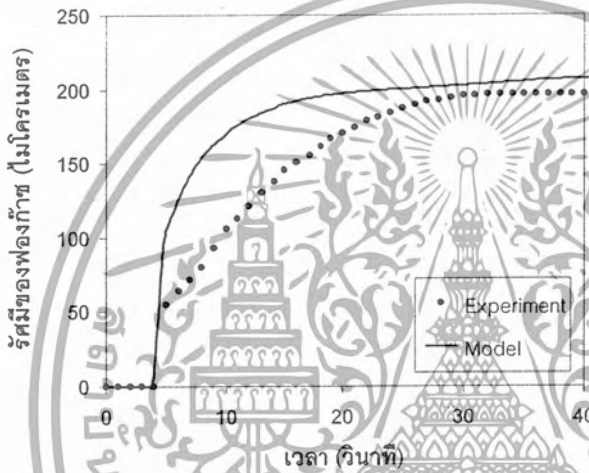
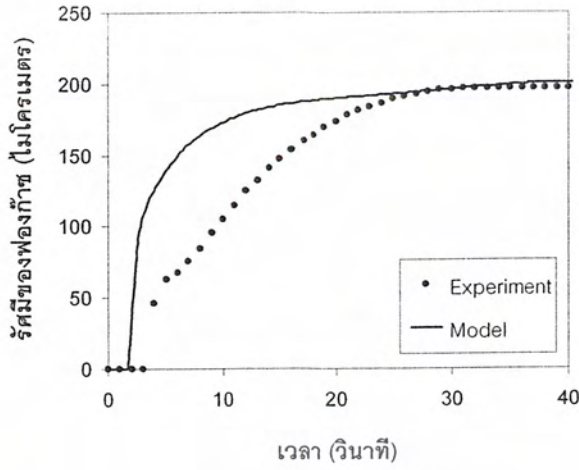


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในฟองก๊าซกับอุณหภูมิต่างๆ ของพื้นผิวแม่พิมพ์

5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

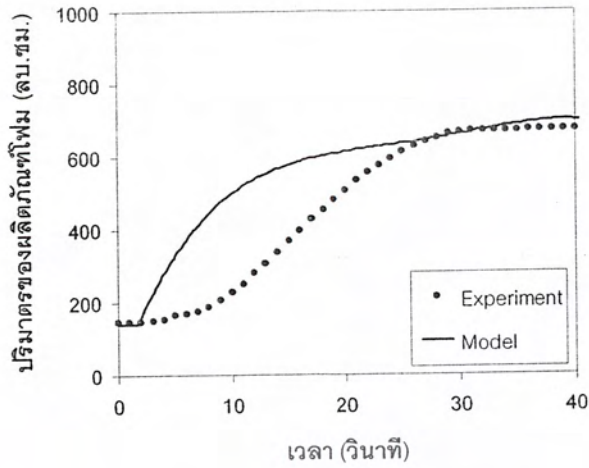
เมื่อทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณตามสมการที่ (2.2) เช่น $p(t)$, $n_{\infty}(t)$ และ $T(t)$ อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่งกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม สามารถทำนายได้จากผลลัพธ์ซึ่งแสดงได้ในเทอมของ $r(t)$ ตามรูปที่ 5.5

พบว่า ผลจากการคำนวณจากแบบจำลอง กราฟจะไม่ได้เริ่มต้นที่เวลา 0 วินาที เนื่องจากแบบจำลองพิจารณาเฉพาะช่วงการเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) และในเวลาช่วงแรก ผลการคำนวณจากแบบจำลองให้ค่าอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซ สูงกว่าผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองที่ใช้ไม่นำผลการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของพอลิเมอร์มาใช้ในการคำนวณ โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเตรียมพอลิยูรีเทน ค่าความหนืดในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เมื่อแบบจำลองไม่นำค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดมาใช้ในการคำนวณ จึงเป็นผลให้อัตราการขยายตัวจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของปฏิกิริยาการเกิดโฟม ความหนืดของพอลิยูรีเทน มีค่าสูงมากจนไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากโครงร่างตาข่ายของพอลิยูรีเทนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การทำนายอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซในช่วงท้ายของการเกิดปฏิกิริยา มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมที่ผลิตได้

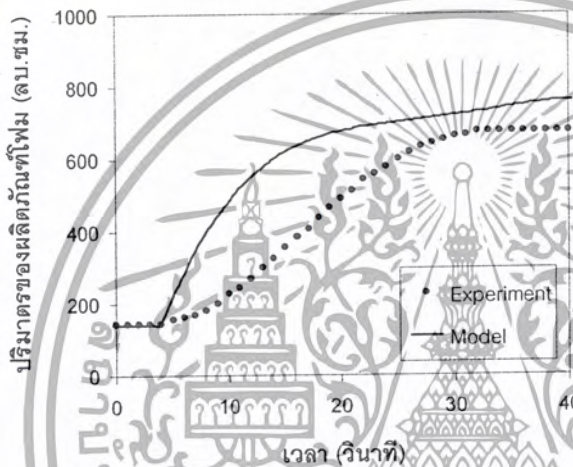


รูปที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบปริมาณของฟองก๊าซที่ทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ

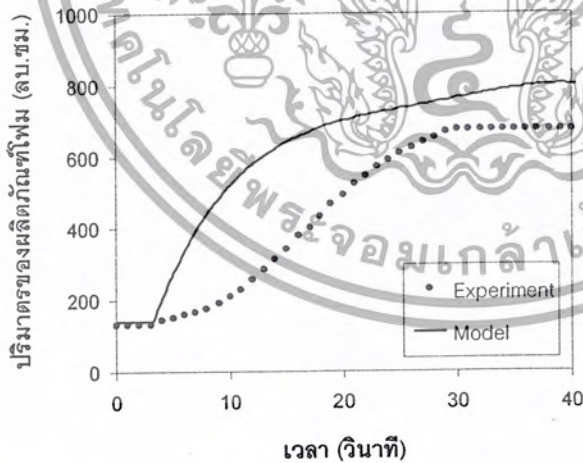
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คุณหมุมิพื้นผิวแม่พิมพ์
30 องศาเซลเซียส



(ข) คุณหมุมิพื้นผิวแม่พิมพ์
55 องศาเซลเซียส



(ค) คุณหมุมิพื้นผิวแม่พิมพ์
80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฟโหมที่ทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลอง
ที่คุณหมุมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 แสดงผลการทำนายปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์โฟมที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง พบว่า แบบจำลองให้ผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าการทดลอง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาตรสุดท้ายของโฟมจะขยายตัวมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม เช่น ขนาดของฟองก๊าซและความหนาแน่นของโฟม เป็นต้น

จากการพัฒนาและสร้างแบบจำลองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์โฟม เมื่อทราบค่าอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์และปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบกับกระบวนการจัดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม และผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการจัดพอลิยูรีเทนโฟม คณะผู้วิจัยสามารถสร้างความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาและระยะทางการไหลของโฟมในแม่พิมพ์ นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่สามารถใช้ทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม เพื่อให้เป็นแนวทางปรับแก้โรงงานจัดโฟมที่เหมาะสมและแนวทางในการปรับลดเศษโฟมจากรูล้นในแม่พิมพ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ในกระบวนการจัดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม จัดเป็นกระบวนการหล่อเย็น เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

6.1.2 อุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับสภาวะการจัดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

6.1.3 การขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม เป็นผลมาจากการเกิดฟองก๊าซขึ้นระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและการขยายตัวของฟองก๊าซภายในเนื้อโฟม เมื่อได้รับความร้อน

6.1.4 อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซและความหนาแน่นของเนื้อโฟมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์

6.1.5 สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่ใช้ทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม

6.2 ข้อเสนอแนะ

เรื่องที่จะควรศึกษาต่อ คือ

6.2.1 การทดลองศึกษาผลของความหนืดที่มีต่อการขยายตัวของฟองก๊าซ

6.2.2 การทดลองศึกษาผลของความดันที่มีการขยายตัวของฟองก๊าซ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์ และปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ "รายงานสรุปผลฝึกงานเทคโนโลยีสะอาด บริษัท ชัมมิทสเดี่ยริงวิล จำกัด." สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2546.
- [2] Chang Dae Han and Hee Ju Yoo "Studies on Structural Foam Processing IV. Bubble Growth During Mold Filling" *Polym Eng. Sci.*, 21, 518-532, 1981.
- [3] Nakagawa Toshi, Takefumi Nagata, Masataka Tanigaki and Masahiro Ohshima "Simulation of Polyurethane Foam" Proc. of Symposium Chemical Engineering Japan., C105, 2000.
- [4] Himanshu Sheth and Lee Chen. "Initial Stages of Bubble Growth During Foaming Process." Technical Paper, Trexel, Inc.
- [5] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] เสาวรณี ชัยจุลจิตต์. Properties of Polymer. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Daniel Klemperer and Kurt C. Frisch. Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. : Hanser Publishers. 1991.
- [8] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar and Duncan A. Mellichamp Process dynamic and control. John Wiley & son.: New York. 1995
- [9] Thomas E. Marlin. Process control: Designing Processes and control systems for dynamic performance. 2nd edition McGraw-Hill.: Singapore. 2000.
- [10] George Woods. The ICI polyurethanes Book. : ICI Polyurethanes and John Wiley & son.: New York. 1987
- [11] ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. 2527.
- [12] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2531.
- [13] ชลธิชา นุ่มหอม. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : พรศิวการพิมพ์. 2538.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] บริษัทปิโตรเคมีแห่งชาติ. ศัพท์บัญญัติปิโตรเคมีและคำอธิบาย. พิมพ์ครั้งที่ 1
- [15] ศรีบุตร แวงเจริญ และ ชนศักดิ์ บ่ายเที่ยง. คณิตศาสตร์วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์
Series 3. ครั้งที่ 1 : วงตะวัน. 2541.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย [10,14]

1. พอลิเมอร์ (Polymer) หมายถึง สารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง 5,000 ขึ้นไป ได้จากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันหรือต่างกัน เช่น พอลิยูรีเทน, ยาง และเซลลูโลส เป็นต้น
2. การเกิดพอลิเมอร์ (Polymerisation) หมายถึง ปฏิกริยาที่ทำให้โมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เกิดปฏิกิริยาแบบกลั่นตัวหรือรวมตัวเป็นสายโซ่ยาวๆ และมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหลายพันเท่าขึ้นไปของโมโนเมอร์ จึงได้คุณสมบัติต่างๆ แตกต่างไปจากโมโนเมอร์
3. โฟม (Foam) หมายถึง วัสดุความหนาแน่นต่ำที่มีฟองก๊าซอยู่ภายใน แบ่งออกเป็น โฟมคงรูปและโฟมยืดหยุ่น
4. สารเติมแต่ง (Additive) หมายถึง สารเคมีที่มีคุณสมบัติเฉพาะ ใช้เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติและตกแต่งให้สวยงาม ได้แก่ สารเพิ่มเนื้อ, สารเพิ่มเสถียรภาพพลาสติก สี สารหล่อลื่น สารช่วยขึ้นรูป สารลดการสลายตัว เป็นต้น
5. ค่าฟังก์ชันนอลิตี (functionality) หมายถึง ปริมาณของหมู่ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในโมเลกุลของสารเคมี
6. อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) หมายถึง อุณหภูมิที่พอลิเมอร์สภาพอสัณฐานหรือกึ่งผลึกเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งและเปราะหรือสภาพคล้ายแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

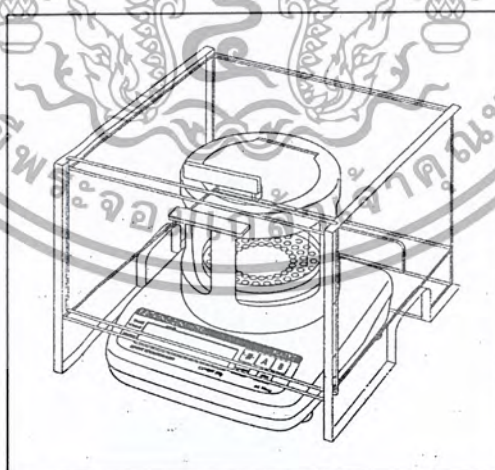
ภาคผนวก ข

การหาความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม โดยเครื่องคำนวณค่าความหนาแน่น

- ตัดชิ้นโฟมตัวอย่างที่ได้จากการฉีดในแต่ละสภาวะ ที่ระยะของการไหล 0, 10, 20, 30, 40 เซนติเมตรตามลำดับ ขนาดความกว้างxความยาวxความหนา เท่ากับ 0.5x2x0.5 เซนติเมตรตามลำดับ

- ตั้งค่าจอแสดงผลให้เป็นศูนย์ (set zero)
- ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างในอากาศ กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องบันทึกค่าไว้
- ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างอีกครั้งในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่ชิ้นโฟมตัวอย่างให้พยายามกำจัดออก) กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นโฟมตัวอย่าง
- เครื่องจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกดปุ่ม A)
- นำชิ้นโฟมตัวอย่างออกจากเครื่อง

หมายเหตุ : ในการนำชิ้นโฟมตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้ น้ำล้นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูป ข-1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

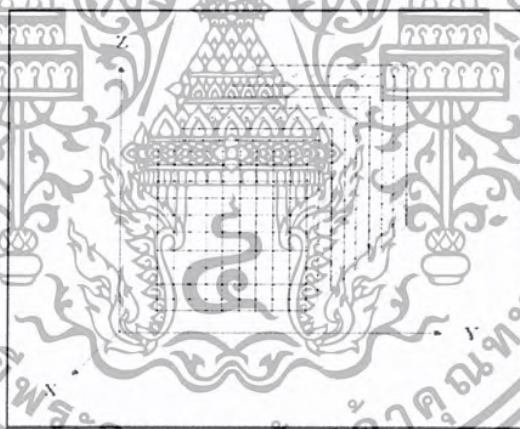
การหาปริมาตรของโพม

โดยอาศัยวิธีการอินทิกรัลสามชั้นในระบบพิกัดฉาก

(Triple Integral in Rectangular Coordinate) [13]

ทฤษฎี

กำหนดให้ $Q = \{(x, y, z) / a_1 \leq x \leq a_2, b_1 \leq y \leq b_2, c_1 \leq z \leq c_2\}$ เรียก Q ว่า ก่อ่งสี่เหลี่ยม (Rectangular Box) และเรียกก่่งสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ว่า เซลล์ (Cell) เมื่อแบ่ง Q เป็น ก่่งเล็ก ๆ ซึ่งจะแทนการแบ่ง (Partition) ดังกล่าวด้วย P ขนาดของ P (Norm) ด้วย $\|P\|$ กำหนดให้ $\sum_{i=1}^n f(x_i^*, y_i^*, z_i^*) \Delta V_i$ เป็นจุดใดๆ เซลล์ที่ i ให้ปริมาตรของเซลล์แทนด้วย $\Delta V_i = \Delta x_i \Delta y_i \Delta z_i$ เรียกการรวม $\iiint_Q f(x, y, z) dv = \lim_{\|P\| \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i^*, y_i^*, z_i^*) \Delta V_i$ ว่าผลรวมรีมานน์ และถ้าขนาดของ P (Norm) เข้าใกล้ศูนย์ จะได้ผลรวมรีมานน์ เรียกผลรวมว่าอินทิกรัลสามชั้น ของ f เหนือบริเวณ Q



รูป ค-1 รูปทรงสี่เหลี่ยมในระบบพิกัดฉาก

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม

การหาจำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโฟม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_c \cong \left(\frac{1 - \rho / \rho_p}{10^{-4} d} \right)$$

โดยอาศัยผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟม (Foam Visualization Study) ดังตาราง ง-1

ตาราง ง-1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟม

Temperature (°C)	Polymer density ; ρ_p (g/cm ³)	Foam density ; ρ (g/cm ³)	Avg. diameter of bubble ; d (mm)	No. Cell ; N_c (cell/cm ³)
30	1.098	0.205	0.332	24490
55	1.098	0.197	0.334	24567
80	1.098	0.201	0.363	22621

ตัวอย่างการคำนวณ

กรณีอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ

$$N_c = \left(\frac{1 - \left(\frac{0.205}{1.098} \right)}{10^{-4} (0.332)} \right)$$

$$N_c = \left(\frac{0.8133}{10^{-4} (0.332)} \right)$$

$$N_c \cong 24490$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมพอลิแมท

- 1) ผลการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นกับเวลา

POLYMATH Results

No Title 04-27-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
Xpoly	0.633	0.2681386	0.633	0.2681386
Xiso	0.367	0.1114918	0.367	0.1114918
Xurethane	0	0	0.4013766	0.4013766
Xco2	0	0	0.0485563	0.0485563
Xurea	0	0	0.162011	0.162011
Ntotal	1	1	9.0020241	9.0020241
Npoly	0.633	0.0297865	0.633	0.0297865
Niso	0.367	0.0123852	0.367	0.0123852
Nurethane	0	0	0.0445886	0.0445886
Nco2	0	0	0.0054671	0.0053939
Nurea	0	0	0.0180025	0.0179972

ODE Report (RK45)

Differential equations as entered by the user

[1] $d(Xpoly)/d(t) = (-1.81488 \times 10^{-6})t^2 + (3.2272 \times 10^{-4})t - (1.4608 \times 10^{-2})$

[2] $d(Xiso)/d(t) = (-1.25007 \times 10^{-6})t^2 + (2.277 \times 10^{-4})t - (1.0275 \times 10^{-2})$

[3] $d(Xurethane)/d(t) = (2.82153 \times 10^{-6})t^2 - (4.0932 \times 10^{-4})t + (1.6716 \times 10^{-2})$

[4] $d(Xco2)/d(t) = (0.42759 \times 10^{-6})t^2 - (0.61742 \times 10^{-4})t + (0.22207 \times 10^{-2})$

[5] $d(Xurea)/d(t) = (1.11033 \times 10^{-6})t^2 - (1.6615 \times 10^{-4})t + (0.67811 \times 10^{-2})$

[6] $d(Ntotal)/d(t) = Npoly + Niso + Nurethane + Nco2 + Nurea$

Explicit equations as entered by the user

[1] $Npoly = Xpoly/Ntotal$

[2] $Niso = Xiso/Ntotal$

[3] $Nurethane = Xurethane/Ntotal$

[4] $Nco2 = Xco2/Ntotal$

[5] $Nurea = Xurea/Ntotal$

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-1 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน

t	Ntotal	Npoly	Niso	Nurethane	Nco2	Nurea	Xpoly	Xiso	Xurethane	Xco2	Xurea
(sec)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)					
0.00	1.0000	0.6330	0.3670	0.0000	0.0000	0.0000	0.6330	0.3670	0.0000	0.0000	0.0000
0.91	1.6769	0.3886	0.2244	0.0081	0.0011	0.0033	0.6199	0.3578	0.0150	0.0020	0.0061
1.21	1.8508	0.3498	0.2017	0.0099	0.0013	0.0040	0.6155	0.3547	0.0200	0.0026	0.0081
1.85	2.1695	0.2907	0.1674	0.0132	0.0018	0.0054	0.6065	0.3484	0.0303	0.0040	0.0123
2.17	2.3125	0.2695	0.1547	0.0146	0.0019	0.0059	0.6020	0.3452	0.0354	0.0047	0.0143
2.49	2.4472	0.2519	0.1443	0.0159	0.0021	0.0065	0.5976	0.3421	0.0404	0.0053	0.0164
2.81	2.5749	0.2370	0.1356	0.0171	0.0023	0.0069	0.5932	0.3390	0.0454	0.0060	0.0184
3.45	2.8130	0.2129	0.1214	0.0182	0.0025	0.0078	0.5845	0.3329	0.0553	0.0073	0.0224
3.77	2.9248	0.2029	0.1155	0.0201	0.0027	0.0082	0.5802	0.3298	0.0602	0.0079	0.0244
4.09	3.0325	0.1940	0.1102	0.0210	0.0028	0.0085	0.5759	0.3268	0.0650	0.0086	0.0264
4.41	3.1366	0.1860	0.1055	0.0219	0.0029	0.0089	0.5716	0.3238	0.0698	0.0092	0.0283
5.05	3.3349	0.1720	0.0972	0.0234	0.0031	0.0095	0.5632	0.3179	0.0793	0.0104	0.0322
5.37	3.4299	0.1659	0.0936	0.0242	0.0032	0.0098	0.5591	0.3150	0.0840	0.0111	0.0341
5.69	3.5222	0.1602	0.0902	0.0248	0.0033	0.0101	0.5550	0.3121	0.0887	0.0117	0.0360
6.01	3.6122	0.1550	0.0871	0.0255	0.0034	0.0103	0.5509	0.3093	0.0933	0.0123	0.0378
6.65	3.7859	0.1455	0.0815	0.0268	0.0035	0.0109	0.5428	0.3036	0.1024	0.0134	0.0415
6.97	3.8698	0.1413	0.0789	0.0273	0.0036	0.0111	0.5388	0.3008	0.1069	0.0140	0.0434
7.29	3.9520	0.1373	0.0765	0.0279	0.0037	0.0113	0.5348	0.2980	0.1114	0.0146	0.0452
7.61	4.0324	0.1335	0.0743	0.0285	0.0037	0.0115	0.5309	0.2952	0.1158	0.0152	0.0470
8.25	4.1888	0.1265	0.0701	0.0295	0.0039	0.0120	0.5231	0.2897	0.1245	0.0163	0.0505
8.57	4.2648	0.1233	0.0682	0.0300	0.0039	0.0122	0.5193	0.2870	0.1288	0.0169	0.0523
8.89	4.3395	0.1202	0.0664	0.0304	0.0040	0.0123	0.5154	0.2843	0.1331	0.0174	0.0540
9.21	4.4129	0.1173	0.0647	0.0309	0.0040	0.0125	0.5117	0.2817	0.1374	0.0179	0.0557
9.85	4.5563	0.1119	0.0614	0.0318	0.0041	0.0129	0.5042	0.2764	0.1457	0.0190	0.0591
10.17	4.6263	0.1094	0.0599	0.0322	0.0042	0.0131	0.5005	0.2738	0.1498	0.0195	0.0608
10.49	4.6952	0.1070	0.0585	0.0326	0.0042	0.0132	0.4968	0.2712	0.1539	0.0201	0.0624
10.81	4.7632	0.1047	0.0571	0.0330	0.0043	0.0134	0.4932	0.2687	0.1580	0.0206	0.0641
11.45	4.8963	0.1003	0.0545	0.0337	0.0044	0.0137	0.4860	0.2636	0.1660	0.0216	0.0673
11.77	4.9615	0.0982	0.0532	0.0341	0.0044	0.0138	0.4824	0.2611	0.1700	0.0221	0.0689
12.09	5.0259	0.0962	0.0520	0.0344	0.0045	0.0140	0.4789	0.2587	0.1739	0.0226	0.0705
12.41	5.0895	0.0943	0.0509	0.0348	0.0045	0.0141	0.4754	0.2562	0.1777	0.0231	0.0721
13.05	5.2142	0.0907	0.0487	0.0354	0.0046	0.0144	0.4685	0.2514	0.1854	0.0240	0.0752
13.37	5.2755	0.0890	0.0477	0.0357	0.0046	0.0145	0.4651	0.2490	0.1892	0.0245	0.0767
13.69	5.3361	0.0873	0.0467	0.0360	0.0047	0.0146	0.4617	0.2466	0.1929	0.0250	0.0782
14.01	5.3960	0.0857	0.0457	0.0363	0.0047	0.0147	0.4583	0.2442	0.1966	0.0254	0.0797
14.65	5.5138	0.0827	0.0439	0.0369	0.0048	0.0149	0.4517	0.2396	0.2039	0.0264	0.0827
14.97	5.5718	0.0812	0.0430	0.0371	0.0048	0.0150	0.4484	0.2373	0.2076	0.0268	0.0841
15.29	5.6292	0.0798	0.0422	0.0374	0.0048	0.0152	0.4452	0.2350	0.2111	0.0272	0.0856
15.61	5.6860	0.0784	0.0413	0.0376	0.0049	0.0153	0.4420	0.2327	0.2147	0.0277	0.0870
16.25	5.7979	0.0758	0.0398	0.0381	0.0049	0.0155	0.4356	0.2283	0.2217	0.0285	0.0899
16.57	5.8530	0.0745	0.0390	0.0383	0.0049	0.0155	0.4325	0.2261	0.2251	0.0290	0.0912
16.89	5.9077	0.0733	0.0383	0.0386	0.0050	0.0156	0.4294	0.2239	0.2285	0.0294	0.0926
17.21	5.9618	0.0721	0.0375	0.0388	0.0050	0.0157	0.4263	0.2217	0.2319	0.0298	0.0940
17.85	6.0686	0.0698	0.0362	0.0392	0.0050	0.0159	0.4202	0.2175	0.2385	0.0306	0.0967
18.17	6.1213	0.0687	0.0355	0.0394	0.0051	0.0160	0.4172	0.2154	0.2418	0.0310	0.0980
18.49	6.1735	0.0676	0.0349	0.0396	0.0051	0.0161	0.4142	0.2133	0.2451	0.0314	0.0993
18.81	6.2253	0.0666	0.0342	0.0398	0.0051	0.0161	0.4113	0.2112	0.2483	0.0318	0.1006
19.45	6.3276	0.0646	0.0330	0.0402	0.0051	0.0163	0.4054	0.2071	0.2546	0.0326	0.1032
19.77	6.3781	0.0636	0.0324	0.0403	0.0052	0.0163	0.4026	0.2051	0.2578	0.0329	0.1045
20.09	6.4282	0.0626	0.0319	0.0405	0.0052	0.0164	0.3997	0.2031	0.2609	0.0333	0.1057

ตาราง ๑-1 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน (ต่อ)

t	Ntotal	Npoly	Niso	Nurethane	Nco2	Nurea	Xpoly	Xiso	Xurethane	Xco2	Xurea
(sec)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)	(mol)					
20.41	6.4779	0.0617	0.0313	0.0407	0.0052	0.0185	0.3969	0.2012	0.2639	0.0337	0.1070
21.05	6.5762	0.0599	0.0303	0.0410	0.0052	0.0166	0.3913	0.1973	0.2700	0.0344	0.1094
21.37	6.6248	0.0591	0.0297	0.0411	0.0052	0.0167	0.3886	0.1953	0.2730	0.0348	0.1106
21.69	6.6730	0.0582	0.0292	0.0413	0.0055	0.0167	0.3859	0.1934	0.2759	0.0351	0.1118
22.01	6.7209	0.0574	0.0287	0.0414	0.0055	0.0168	0.3832	0.1915	0.2788	0.0354	0.1130
22.65	6.8156	0.0558	0.0278	0.0417	0.0053	0.0169	0.3779	0.1878	0.2846	0.0361	0.1153
22.97	6.8625	0.0551	0.0273	0.0418	0.0053	0.0169	0.3752	0.1860	0.2874	0.0365	0.1164
23.29	6.9090	0.0543	0.0269	0.0419	0.0053	0.0170	0.3725	0.1842	0.2902	0.0368	0.1176
23.61	6.9553	0.0536	0.0264	0.0421	0.0053	0.0170	0.3701	0.1824	0.2930	0.0371	0.1187
24.25	7.0468	0.0521	0.0256	0.0423	0.0053	0.0171	0.3650	0.1788	0.2984	0.0377	0.1209
24.57	7.0921	0.0515	0.0252	0.0424	0.0054	0.0172	0.3625	0.1771	0.3011	0.0380	0.1220
24.89	7.1371	0.0508	0.0248	0.0425	0.0054	0.0172	0.3600	0.1754	0.3038	0.0383	0.1230
25.21	7.1818	0.0501	0.0244	0.0426	0.0054	0.0173	0.3576	0.1736	0.3064	0.0386	0.1241
25.85	7.2704	0.0488	0.0236	0.0428	0.0054	0.0173	0.3527	0.1703	0.3116	0.0392	0.1262
26.17	7.3143	0.0482	0.0232	0.0429	0.0054	0.0174	0.3504	0.1686	0.3142	0.0395	0.1272
26.49	7.3579	0.0476	0.0229	0.0430	0.0054	0.0174	0.3480	0.1669	0.3167	0.0398	0.1282
26.81	7.4012	0.0470	0.0225	0.0431	0.0054	0.0174	0.3457	0.1653	0.3192	0.0401	0.1292
27.45	7.4871	0.0458	0.0218	0.0432	0.0054	0.0175	0.3411	0.1621	0.3241	0.0406	0.1312
27.77	7.5297	0.0453	0.0215	0.0433	0.0054	0.0175	0.3386	0.1605	0.3265	0.0409	0.1322
28.09	7.5720	0.0447	0.0212	0.0434	0.0054	0.0176	0.3366	0.1590	0.3289	0.0412	0.1331
28.41	7.6141	0.0442	0.0208	0.0435	0.0054	0.0176	0.3343	0.1574	0.3313	0.0414	0.1341
29.05	7.6976	0.0431	0.0202	0.0436	0.0054	0.0177	0.3300	0.1544	0.3360	0.0420	0.1360
29.37	7.7390	0.0426	0.0199	0.0437	0.0055	0.0177	0.3278	0.1529	0.3383	0.0422	0.1369
29.69	7.7801	0.0421	0.0196	0.0437	0.0055	0.0177	0.3257	0.1514	0.3405	0.0425	0.1378
30.01	7.8211	0.0416	0.0193	0.0438	0.0055	0.0177	0.3236	0.1499	0.3428	0.0427	0.1387
30.65	7.9023	0.0407	0.0187	0.0439	0.0055	0.0178	0.3194	0.1470	0.3472	0.0432	0.1405
30.97	7.9425	0.0402	0.0185	0.0440	0.0055	0.0178	0.3174	0.1456	0.3493	0.0434	0.1413
31.29	7.9826	0.0397	0.0182	0.0440	0.0055	0.0178	0.3154	0.1442	0.3515	0.0436	0.1422
31.61	8.0225	0.0393	0.0179	0.0441	0.0055	0.0178	0.3134	0.1428	0.3536	0.0439	0.1430
32.25	8.1016	0.0384	0.0174	0.0441	0.0055	0.0179	0.3094	0.1401	0.3578	0.0443	0.1447
32.57	8.1408	0.0380	0.0172	0.0442	0.0055	0.0179	0.3075	0.1387	0.3598	0.0445	0.1455
32.89	8.1799	0.0376	0.0169	0.0442	0.0055	0.0179	0.3056	0.1374	0.3619	0.0447	0.1463
33.21	8.2187	0.0372	0.0167	0.0443	0.0055	0.0179	0.3037	0.1361	0.3639	0.0449	0.1471
33.85	8.2959	0.0364	0.0162	0.0443	0.0055	0.0179	0.2999	0.1335	0.3678	0.0453	0.1487
34.17	8.3342	0.0360	0.0160	0.0444	0.0055	0.0179	0.2981	0.1322	0.3698	0.0455	0.1495
34.49	8.3723	0.0356	0.0158	0.0444	0.0055	0.0179	0.2963	0.1309	0.3717	0.0457	0.1502
34.81	8.4102	0.0352	0.0155	0.0444	0.0055	0.0180	0.2845	0.1297	0.3736	0.0459	0.1510
35.45	8.4856	0.0345	0.0151	0.0445	0.0055	0.0180	0.2910	0.1273	0.3773	0.0463	0.1525
35.77	8.5230	0.0341	0.0149	0.0445	0.0055	0.0180	0.2892	0.1261	0.3791	0.0465	0.1532
36.09	8.5602	0.0338	0.0147	0.0445	0.0054	0.0180	0.2875	0.1249	0.3809	0.0466	0.1539
36.41	8.5973	0.0334	0.0145	0.0445	0.0054	0.0180	0.2858	0.1237	0.3827	0.0468	0.1546
37.05	8.6709	0.0327	0.0141	0.0446	0.0054	0.0180	0.2825	0.1214	0.3862	0.0472	0.1560
37.37	8.7075	0.0324	0.0139	0.0445	0.0054	0.0180	0.2809	0.1203	0.3880	0.0473	0.1567
37.69	8.7439	0.0321	0.0137	0.0446	0.0054	0.0180	0.2792	0.1191	0.3897	0.0475	0.1574
38.01	8.7802	0.0318	0.0135	0.0446	0.0054	0.0180	0.2776	0.1180	0.3913	0.0476	0.1581
38.65	8.8522	0.0312	0.0132	0.0446	0.0054	0.0180	0.2745	0.1159	0.3947	0.0479	0.1594
38.97	8.8880	0.0309	0.0130	0.0446	0.0054	0.0180	0.2730	0.1148	0.3963	0.0481	0.1600
39.29	8.9237	0.0306	0.0128	0.0446	0.0054	0.0180	0.2714	0.1138	0.3979	0.0482	0.1608
39.61	8.9582	0.0303	0.0127	0.0446	0.0054	0.0180	0.2699	0.1127	0.3995	0.0484	0.1613
40.00	9.0020	0.0238	0.0124	0.0446	0.0054	0.0180	0.2681	0.1115	0.4014	0.0486	0.1620

- 2) ผลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิกายในแม่พิมพ์
ณ ระยะเวลาไหลของโม่ที่มีค่าอัตราการขยายตัวของโม่สูงสุด

POLYMATH Results

Temperature 30 °C 04-07-2547, Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	5	5	126	126
T	29.385	23.780872	126.10379	113.8244
dT1	0.5887889	-3.9009488	3.0787475	-3.9009488
X	26.16	26.16	26.16	26.16
a1	-4.744 x 10 ⁻⁹	-4.744 x 10 ⁻⁹	-4.744 x 10 ⁻⁹	-4.744 x 10 ⁻⁹
b1	1.811x 10 ⁻⁶	1.811x 10 ⁻⁶	1.811x 10 ⁻⁶	1.811x 10 ⁻⁶
c1	-2.544 x 10 ⁻⁴	-2.544 x 10 ⁻⁴	-2.544 x 10 ⁻⁴	-2.544 x 10 ⁻⁴
d1	0.0157111	0.0157111	0.0157111	0.0157111
e1	-0.3879178	-0.3879178	-0.3879178	-0.3879178
f1	3.411269	3.411269	3.411269	3.411269
g1	22.012732	22.012732	22.012732	22.012732

ODE Report (RK56)

Differential equations as entered by the user

[1] $d(T)/d(t) = dT1$

Explicit equations as entered by the user

[1] $X = 26.16$

[2] $dT1 = (6a1)t^5 + (5b1)t^4 + (4c1)t^3 + (3d1)t^2 + (2e1)t + f1$

[3] $a1 = (-5.40275 \times 10^{-9})X^4 + (0.00478859)X^3 - (0.133965)X^2 + (1.05565)X - (1.1066 \times 10^{-9})$

[4] $b1 = (2.1645 \times 10^{-5})X^4 - (0.00191592)X^3 + (0.0537552)X^2 - (0.425204)X + (0.309577 \times 10^{-6})$

[5] $c1 = (-3.29617 \times 10^{-5})X^4 + (0.00291011)X^3 - (0.0818921)X^2 + (0.652475)X + (0.231648 \times 10^{-4})$

[6] $d1 = (2.34352 \times 10^{-5})X^4 - (0.00205948)X^3 + (0.0581365)X^2 - (0.469329)X - (0.0422775 \times 10^{-2})$

[7] $e1 = (-7.52989 \times 10^{-6})X^4 + (0.000655898)X^3 - (0.018577)X^2 + (0.153571)X + 0.0920167$

[8] $f1 = (8.24742 \times 10^{-5})X^4 - (0.00700566)X^3 + (0.197943)X^2 - (1.68837)X - 1.08875$

[9] $g1 = (-1.94284 \times 10^{-5})X^4 + (0.00151719)X^3 - (0.0418382)X^2 + (0.368722)X + 31.2471$

Comments

[10] $X = 26.16$

$X = 26.16 \text{ cm at } (dW/dt)_{max}$

Independent variable

variable name : t

initial value : 5

final value : 126

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-2 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
5.00	29.39	0.59	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
5.00	29.39	0.59	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
5.00	29.39	0.59	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
5.02	29.40	0.58	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
6.95	29.90	-0.03	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
7.92	29.76	-0.25	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
8.89	29.43	-0.42	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
9.86	28.96	-0.55	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
11.79	27.74	-0.68	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
12.76	27.07	-0.70	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
13.73	26.40	-0.68	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
14.70	25.76	-0.64	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
16.63	24.66	-0.48	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
17.60	24.25	-0.37	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
18.57	23.95	-0.25	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
19.54	23.78	-0.11	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
21.47	23.87	0.20	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
22.44	24.15	0.37	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
23.41	24.59	0.54	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
24.38	25.20	0.72	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
26.31	26.93	1.07	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
27.28	28.05	1.25	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
28.25	29.34	1.42	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
29.22	30.80	1.59	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
31.15	34.19	1.91	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
32.12	36.11	2.06	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
33.09	38.17	2.20	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
34.06	40.37	2.33	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
35.99	45.12	2.57	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
36.96	47.66	2.67	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
37.93	50.29	2.76	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
38.90	53.01	2.85	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
40.83	58.65	2.97	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
41.80	61.55	3.02	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
42.77	64.48	3.05	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
43.74	67.45	3.07	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
45.67	73.41	3.08	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
46.64	76.38	3.07	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
47.61	79.34	3.04	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
48.58	82.27	3.00	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
50.51	87.99	2.90	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
51.48	90.77	2.84	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
52.45	93.48	2.76	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
53.42	96.11	2.68	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
55.35	101.12	2.49	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
56.32	103.47	2.38	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
57.29	105.72	2.27	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
58.26	107.86	2.15	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
60.19	111.78	1.90	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
61.16	113.55	1.77	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
62.13	115.20	1.63	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
63.10	116.71	1.50	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
65.03	119.34	1.22	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
66.00	120.46	1.08	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
66.97	121.44	0.94	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
67.94	122.29	0.81	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
69.87	123.59	0.54	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
70.84	124.06	0.42	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
71.81	124.40	0.29	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
72.78	124.63	0.18	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-2 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิกายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
74.71	124.76	-0.04	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
75.68	124.66	-0.14	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
76.65	124.48	-0.24	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
77.62	124.21	-0.32	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
79.55	123.44	-0.47	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
80.52	122.96	-0.53	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
81.49	122.43	-0.58	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
82.46	121.85	-0.62	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
84.39	120.59	-0.67	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
85.36	119.93	-0.68	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
86.33	119.27	-0.69	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
87.30	118.61	-0.68	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
89.23	117.33	-0.63	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
90.20	116.74	-0.60	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
91.17	116.18	-0.55	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
92.14	115.67	-0.50	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
94.07	114.83	-0.37	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
95.04	114.51	-0.29	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
96.01	114.27	-0.21	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
96.98	114.11	-0.12	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
98.91	114.06	0.07	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
99.88	114.18	0.17	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
100.85	114.38	0.26	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
101.82	114.69	0.36	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
103.75	115.57	0.55	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
104.72	116.15	0.64	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
105.69	116.80	0.72	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
106.66	117.53	0.79	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
108.59	119.17	0.89	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
109.56	120.05	0.93	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
110.53	120.95	0.94	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
111.50	121.86	0.93	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
113.43	123.59	0.84	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
114.40	124.36	0.75	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
115.37	125.04	0.63	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
116.34	125.57	0.48	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
118.27	126.10	0.04	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
119.24	126.01	-0.24	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
120.21	125.61	-0.58	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
121.18	124.87	-0.97	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
123.11	122.09	-1.94	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
124.08	119.94	-2.52	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
125.05	117.18	-3.18	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01
126.00	113.82	-3.90	26.16	-4.7E-09	1.8E-06	-2.5E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLYMATH Results

Temperature 55 °C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	5	5	126	126
T	46.65	39.593994	128.55995	112.73188
dT1	1.6929377	-4.4267711	2.7568459	-4.4267711
X	25.29	25.29	25.29	25.29
a1	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹
b1	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶
c1	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴
d1	0.0189886	0.0189886	0.0189886	0.0189886
e1	-0.5385045	-0.5385045	-0.5385045	-0.5385045
f1	5.7914958	5.7914958	5.7914958	5.7914958
g1	30.541013	30.541013	30.541013	30.541013

ODE Report (RKFS6)

Differential equations as entered by the user

[1] $d(T)/d(t) = dT1$

Explicit equations as entered by the user

[1] $X = 25.29$

[2] $dT1 = (6a1)t^5 + (5b1)t^4 + (4c1)t^3 + (3d1)t^2 + (2e1)t + f1$

[3] $a1 = (-5.32418 \times 10^{-5}) X^4 + (4.72461 \times 10^{-3}) X^3 - (1.32012 \times 10^{-1}) X^2 + (1.10243) X - (3.13381 \times 10^{-9})$

[4] $b1 = (2.11635 \times 10^{-5}) X^4 - (1.87392 \times 10^{-3}) X^3 + (5.24067 \times 10^{-2}) X^2 - (4.35532 \times 10^{-1}) X + (1.11935 \times 10^{-6})$

[5] $c1 = (-3.22459 \times 10^{-5}) X^4 + (2.84392 \times 10^{-3}) X^3 - (7.95313 \times 10^{-2}) X^2 + (6.57396 \times 10^{-1}) X - (1.4429 \times 10^{-4})$

[6] $d1 = (2.31525 \times 10^{-5}) X^4 - (2.02908 \times 10^{-3}) X^3 + (5.66724 \times 10^{-2}) X^2 - (4.65453 \times 10^{-1}) X + (0.77299 \times 10^{-2})$

[7] $e1 = (-7.58861 \times 10^{-5}) X^4 + (6.58580 \times 10^{-3}) X^3 - (1.83436 \times 10^{-1}) X^2 + (1.49428) X - (1.33593 \times 10^{-1})$

[8] $f1 = (8.80895 \times 10^{-5}) X^4 - (7.48328 \times 10^{-3}) X^3 + (2.06609 \times 10^{-1}) X^2 + (1.65355) X + 0.474031$

[9] $g1 = (-3.12875 \times 10^{-5}) X^4 + (2.44804 \times 10^{-3}) X^3 - (6.54450 \times 10^{-2}) X^2 + (5.66137 \times 10^{-1}) X + (37.9554)$

Comments

[10] $X = 25.29$

$X = 25.29 \text{ cm at } (dV/dt)_{max}$

Independent variable

variable name : t

initial value : 5

final value : 126

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLYMATH Results

Temperature 55 °C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	5	5	126	126
T	46.65	39.593994	128.55995	112.73188
dT1	1.6929377	-4.4267711	2.7568459	-4.4267711
X	25.29	25.29	25.29	25.29
a1	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹	-5.045 x 10 ⁻⁹
b1	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶	1.97 x 10 ⁻⁶
c1	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴	-2.874 x 10 ⁻⁴
d1	0.0189886	0.0189886	0.0189886	0.0189886
e1	-0.5385045	-0.5385045	-0.5385045	-0.5385045
f1	5.7914958	5.7914958	5.7914958	5.7914958
g1	30.541013	30.541013	30.541013	30.541013

ODE Report (RKF56)

Differential equations as entered by the user

[1] $d(T)/d(t) = dT1$

Explicit equations as entered by the user

[1] $X = 25.29$

[2] $dT1 = (6a1)t^5 + (5b1)t^4 + (4c1)t^3 + (3d1)t^2 + (2e1)t + f1$

[3] $a1 = (-5.32418 \times 10^{-5})X^4 + (4.72461 \times 10^{-3})X^3 + (1.32012 \times 10^{-1})X^2 + (1.10243)X - (3.13381 \times 10^{-9})$

[4] $b1 = (2.11635 \times 10^{-5})X^4 - (1.87392 \times 10^{-3})X^3 + (5.24067 \times 10^{-2})X^2 - (4.35532 \times 10^{-1})X + (1.11935 \times 10^{-6})$

[5] $c1 = (-3.22459 \times 10^{-5})X^4 + (2.84392 \times 10^{-3})X^3 - (7.95313 \times 10^{-2})X^2 + (6.57396 \times 10^{-1})X - (1.4429 \times 10^{-4})$

[6] $d1 = (2.31525 \times 10^{-5})X^4 - (2.02908 \times 10^{-3})X^3 + (5.66724 \times 10^{-2})X^2 - (4.65453 \times 10^{-1})X + (0.77299 \times 10^{-2})$

[7] $e1 = (-7.58861 \times 10^{-5})X^4 + (6.58580 \times 10^{-3})X^3 - (1.83436 \times 10^{-1})X^2 + (1.49428)X - (1.33593 \times 10^{-1})$

[8] $f1 = (8.80895 \times 10^{-7})X^4 - (7.48328 \times 10^{-3})X^3 + (2.06609 \times 10^{-1})X^2 + (1.65355)X + 0.474031$

[9] $g1 = (-3.12875 \times 10^{-5})X^4 + (2.44804 \times 10^{-3})X^3 - (6.54450 \times 10^{-2})X^2 + (5.66137 \times 10^{-1})X + (37.9554)$

Comments

[10] $X = 25.29$

$X = 25.29 \text{ cm at } (dV/dt)_{max}$

Independent variable

variable name : t

initial value : 5

final value : 126

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-3 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
5.00	46.65	1.69	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
5.00	46.65	1.69	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
5.00	46.65	1.69	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
5.02	46.68	1.68	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
6.95	48.93	0.69	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
7.92	49.41	0.30	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
8.89	49.54	-0.03	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
9.86	49.37	-0.30	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
11.79	48.38	-0.69	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
12.76	47.65	-0.81	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
13.73	46.82	-0.90	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
14.70	45.92	-0.94	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
16.63	44.08	-0.94	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
17.60	43.19	-0.89	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
18.57	42.36	-0.82	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
19.54	41.61	-0.73	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
21.47	40.41	-0.50	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
22.44	39.99	-0.36	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
23.41	39.72	-0.21	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
24.38	39.59	-0.05	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
26.31	39.82	0.29	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
27.28	40.18	0.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
28.25	40.71	0.63	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
29.22	41.41	0.81	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
31.15	43.31	1.15	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
32.12	44.50	1.32	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
33.09	45.85	1.48	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
34.06	47.36	1.63	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
35.99	50.79	1.91	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
36.96	52.71	2.04	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
37.93	54.75	2.16	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
38.90	56.89	2.27	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
40.83	61.48	2.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
41.80	63.90	2.54	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
42.77	66.39	2.60	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
43.74	68.93	2.66	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
45.67	74.15	2.73	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
46.64	76.81	2.75	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
47.61	79.47	2.76	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
48.58	82.14	2.75	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
50.51	87.44	2.71	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
51.48	90.05	2.68	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
52.45	92.62	2.63	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
53.42	95.15	2.58	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
55.35	100.02	2.44	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
56.32	102.35	2.36	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
57.29	104.59	2.28	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
58.26	106.75	2.18	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
60.19	110.78	1.98	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
61.16	112.65	1.87	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
62.13	114.40	1.75	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
63.10	116.04	1.63	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
65.03	118.97	1.39	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
66.00	120.25	1.27	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
66.97	121.42	1.14	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
67.94	122.46	1.02	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
69.87	124.19	0.77	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
70.84	124.88	0.65	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
71.81	125.46	0.53	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
72.78	125.92	0.42	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-3 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
74.71	126.52	0.21	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
75.68	126.68	0.11	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
76.65	126.74	0.02	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
77.62	126.71	-0.07	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
79.55	126.42	-0.22	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
80.52	126.17	-0.29	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
81.49	125.87	-0.34	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
82.46	125.51	-0.39	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
84.39	124.68	-0.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
85.36	124.22	-0.48	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
86.33	123.74	-0.50	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
87.30	123.26	-0.50	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
89.23	122.31	-0.48	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
90.20	121.86	-0.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
91.17	121.43	-0.42	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
92.14	121.04	-0.38	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
94.07	120.39	-0.28	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
95.04	120.15	-0.22	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
96.01	119.96	-0.16	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
96.98	119.85	-0.08	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
98.91	119.83	0.07	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
99.88	119.94	0.15	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
100.85	120.12	0.23	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
101.82	120.38	0.31	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
103.75	121.14	0.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
104.72	121.62	0.53	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
105.69	122.16	0.59	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
106.66	122.77	0.65	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
108.59	124.10	0.72	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
109.56	124.80	0.73	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
110.53	125.50	0.72	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
111.50	126.19	0.70	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
113.43	127.44	0.57	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
114.40	127.94	0.46	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
115.37	128.33	0.33	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
116.34	128.56	0.15	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
118.27	128.42	-0.32	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
119.24	127.97	-0.63	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
120.21	127.20	-0.98	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
121.18	126.05	-1.39	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
123.11	122.42	-2.40	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
124.08	119.81	-3.00	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
125.05	116.58	-3.68	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54
126.00	112.73	-4.43	25.29	-5.0E-09	2.0E-06	-2.9E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLYMATH Results

Temperature 80 °C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	5	5	126	126
T	69.225	61.770418	129.66798	123.86856
dT1	-1.5887494	-1.5887494	1.4509052	-0.1138332
X	26.48	26.48	26.48	26.48
a1	-3.877×10^{-11}	-3.877×10^{-11}	-3.877×10^{-11}	-3.877×10^{-11}
b1	1.587×10^{-9}	1.587×10^{-9}	1.587×10^{-9}	1.587×10^{-9}
c1	5.531×10^{-6}	5.531×10^{-6}	5.531×10^{-6}	5.531×10^{-6}
d1	-0.0013775	-0.0013775	-0.0013775	-0.0013775
e1	0.1161521	0.1161521	0.1161521	0.1161521
f1	-2.64973	-2.64973	-2.64973	-2.64973
g1	83.798764	83.798764	83.798764	83.798764

ODE Report (RKFS6)

Differential equations as entered by the user

[1] $d(T)/d(t) = dT1$

Explicit equations as entered by the user

[1] $X = 26.48$

[2] $dT1 = (6a1)t^5 + (5b1)t^4 + (4c1)t^3 + (3d1)t^2 + (2e1)t + f1$

[3] $a1 = (4.88367 \times 10^{-6})X^4 - (2.82285 \times 10^{-4})X^3 - (1.85097 \times 10^{-3})X^2 + (9.31365 \times 10^{-2})X + (1.2841 \times 10^{-10})$

[4] $b1 = (-2.12281 \times 10^{-6})X^4 + (1.26523 \times 10^{-4})X^3 + (1.2411 \times 10^{-3})X^2 - (4.89518 \times 10^{-2})X - (0.86363 \times 10^{-7})$

[5] $c1 = (2.81001 \times 10^{-6})X^4 - (1.81805 \times 10^{-4})X^3 - (3.07985 \times 10^{-3})X^2 + (9.3128 \times 10^{-2})X + (2.24074 \times 10^{-5})$

[6] $d1 = (-9.1750 \times 10^{-9})X^4 + (2.44835 \times 10^{-5})X^3 + (4.48222 \times 10^{-3})X^2 - (8.41533 \times 10^{-2})X - (2.74207 \times 10^{-3})$

[7] $e1 = (-2.7162 \times 10^{-6})X^4 + (1.63353 \times 10^{-4})X^3 - (4.71233 \times 10^{-3})X^2 + (4.86992 \times 10^{-2})X + (1.47862 \times 10^{-1})$

[8] $f1 = (1.59692 \times 10^{-5})X^4 - (1.07930 \times 10^{-3})X^3 + (2.36565 \times 10^{-2})X^2 - (2.01293 \times 10^{-1})X - (1.71882)$

[9] $g1 = (-1.95647 \times 10^{-5})X^4 + (1.57236 \times 10^{-3})X^3 - (4.67323 \times 10^{-2})X^2 + (6.73726 \times 10^{-1})X + (37.3236)$

Comments

[10] $X = 26.48$

$X = 26.48 \text{ at } (dV/dt)_{max}$

Independent variable

variable name : t

initial value : 5

final value : 126

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-4 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิกายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
5.00	69.23	-1.59	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
5.00	69.22	-1.59	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
5.00	69.22	-1.59	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
5.02	69.20	-1.59	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
6.95	66.48	-1.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
7.92	65.37	-1.06	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
8.89	64.43	-0.90	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
9.86	63.64	-0.74	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
11.79	62.49	-0.45	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
12.76	62.12	-0.31	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
13.73	61.89	-0.18	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
14.70	61.77	-0.06	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
16.63	61.89	0.17	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
17.60	62.11	0.28	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
18.57	62.43	0.38	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
19.54	62.84	0.48	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
21.47	63.94	0.65	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
22.44	64.61	0.73	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
23.41	65.36	0.81	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
24.38	66.17	0.88	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
26.31	68.00	1.01	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
27.28	69.00	1.06	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
28.25	70.06	1.11	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
29.22	71.16	1.16	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
31.15	73.49	1.25	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
32.12	74.72	1.28	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
33.09	75.97	1.31	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
34.06	77.26	1.34	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
35.99	79.91	1.39	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
36.96	81.26	1.41	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
37.93	82.63	1.42	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
38.90	84.01	1.43	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
40.83	86.80	1.45	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
41.80	88.21	1.45	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
42.77	89.61	1.45	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
43.74	91.01	1.45	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
45.67	93.81	1.44	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
46.64	95.19	1.43	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
47.61	96.57	1.41	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
48.58	97.93	1.40	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
50.51	100.61	1.37	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
51.48	101.93	1.35	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
52.45	103.22	1.33	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
53.42	104.50	1.30	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
55.35	106.97	1.25	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
56.32	108.17	1.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
57.29	109.35	1.20	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
58.26	110.49	1.17	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
60.19	112.69	1.11	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
61.16	113.75	1.07	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
62.13	114.77	1.04	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
63.10	115.76	1.01	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
65.03	117.65	0.94	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
66.00	118.54	0.90	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
66.97	119.39	0.87	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
67.94	120.21	0.83	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
69.87	121.75	0.76	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
70.84	122.46	0.72	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
71.81	123.14	0.68	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-4 แสดงข้อมูลการคำนวณอุณหภูมิอุณหภูมิกายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	dT1	x	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1
(sec)	(°C)									
72.78	123.78	0.65	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
74.71	124.96	0.57	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
75.68	125.50	0.54	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
76.65	126.00	0.50	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
77.62	126.47	0.46	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
79.55	127.30	0.39	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
80.52	127.66	0.36	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
81.49	127.99	0.33	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
82.46	128.29	0.29	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
84.39	128.80	0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
85.36	129.00	0.20	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
86.33	129.18	0.17	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
87.30	129.33	0.14	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
89.23	129.54	0.08	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
90.20	129.61	0.06	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
91.17	129.65	0.03	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
92.14	129.67	0.01	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
94.07	129.64	-0.04	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
95.04	129.59	-0.06	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
96.01	129.52	-0.08	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
96.98	129.43	-0.10	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
98.91	129.20	-0.13	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
99.88	129.07	-0.15	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
100.85	128.92	-0.16	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
101.82	128.75	-0.18	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
103.75	128.39	-0.20	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
104.72	128.19	-0.21	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
105.69	127.99	-0.21	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
106.66	127.78	-0.22	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
108.59	127.34	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
109.56	127.12	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
110.53	126.89	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
111.50	126.66	-0.24	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
113.43	126.21	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
114.40	125.99	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
115.37	125.77	-0.23	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
116.34	125.55	-0.22	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
118.27	125.14	-0.21	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
119.24	124.94	-0.20	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
120.21	124.76	-0.19	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
121.18	124.58	-0.18	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
123.11	124.26	-0.15	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
124.08	124.11	-0.14	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
125.05	123.98	-0.13	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80
126.00	123.87	-0.11	26.48	-3.9E-11	1.6E-09	5.5E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลการคำนวณเทอมความดันภายในฟองก๊าซ

โดยอ้างอิงผลของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และปริมาตรของโพนที่ได้จากการทดลอง

POLYMATH Results

Pressure ที่ 30°C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
T	20.6514	20.6514	56.626604	56.626604
V1bub	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	3.339×10^{-5}	3.335×10^{-5}
TK	293.8014	293.8014	329.7766	329.7766
P1bub	0	0	5.231×10^8	3.807×10^6

ODE Report (RKF45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \quad d(\text{nco2})/d(t) = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

$$[2] \quad d(T)/d(t) = (-28.46472 \times 10^{-9})t^5 + (9.05325 \times 10^{-6})t^4 - (10.17676 \times 10^{-4})t^3 + (4.71357 \times 10^{-2})t^2 - (7.75912 \times 10^1)t + 3.41193$$

$$[3] \quad d(V1\text{bub})/d(t) = (-8.4156 \times 10^{-13})t^5 + (9.7064 \times 10^{-11})t^4 - (37.92824 \times 10^{-10})t^3 + (5.27214 \times 10^{-8})t^2 - (9.9594 \times 10^{-8})t + (5.84229 \times 10^{-8})$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \quad \text{TK} = T + 273.15$$

$$[2] \quad \text{P1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / V1\text{bub}$$

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-5 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
0.00	20.65	293.80	0.0000	1.00E-08	0.00E+00
1.00	23.70	296.42	0.0006	3.53E-08	3.61E+08
1.32	24.53	297.27	0.0008	3.80E-08	4.56E+08
1.64	25.28	298.06	0.0009	4.29E-08	5.23E+08
2.28	26.60	299.44	0.0013	6.85E-08	4.89E+08
2.60	27.17	300.04	0.0014	9.35E-08	4.13E+08
2.92	27.69	300.59	0.0016	1.29E-07	3.34E+08
3.24	28.15	301.07	0.0017	1.77E-07	2.66E+08
3.88	28.92	301.89	0.0020	3.16E-07	1.71E+08
4.20	29.23	302.23	0.0021	4.10E-07	1.39E+08
4.52	29.50	302.52	0.0022	5.21E-07	1.15E+08
4.84	29.73	302.77	0.0023	6.50E-07	9.66E+07
5.48	30.07	303.14	0.0025	9.66E-07	7.04E+07
5.80	30.18	303.28	0.0026	1.15E-06	6.10E+07
6.12	30.26	303.38	0.0027	1.36E-06	5.34E+07
6.44	30.31	303.44	0.0028	1.59E-06	4.71E+07
7.08	30.33	303.49	0.0030	2.11E-06	3.74E+07
7.40	30.30	303.47	0.0031	2.41E-06	3.37E+07
7.72	30.24	303.42	0.0032	2.72E-06	3.05E+07
8.04	30.17	303.36	0.0032	3.05E-06	2.77E+07
8.68	29.95	303.16	0.0034	3.78E-06	2.33E+07
9.00	29.82	303.04	0.0035	4.17E-06	2.14E+07
9.32	29.67	302.90	0.0035	4.58E-06	1.98E+07
9.64	29.51	302.74	0.0036	5.01E-06	1.84E+07
10.28	29.15	302.40	0.0037	5.92E-06	1.60E+07
10.60	28.96	302.21	0.0037	6.40E-06	1.50E+07
10.92	28.76	302.01	0.0038	6.89E-06	1.40E+07
11.24	28.55	301.81	0.0038	7.40E-06	1.32E+07
11.88	28.12	301.38	0.0039	8.45E-06	1.18E+07
12.20	27.90	301.16	0.0040	9.01E-06	1.12E+07
12.52	27.68	300.94	0.0040	9.57E-06	1.06E+07
12.84	27.45	300.71	0.0040	1.01E-05	1.01E+07
13.48	27.01	300.27	0.0041	1.13E-05	9.17E+06
13.80	26.79	300.05	0.0041	1.19E-05	8.77E+06
14.12	26.57	299.83	0.0042	1.25E-05	8.40E+06
14.44	26.36	299.62	0.0042	1.31E-05	8.05E+06
15.08	25.96	299.21	0.0043	1.43E-05	7.44E+06
15.40	25.76	299.01	0.0043	1.49E-05	7.17E+06
15.72	25.58	298.82	0.0043	1.55E-05	6.92E+06
16.04	25.40	298.64	0.0043	1.61E-05	6.68E+06
16.68	25.08	298.31	0.0044	1.73E-05	6.26E+06
17.00	24.93	298.15	0.0044	1.79E-05	6.07E+06
17.32	24.80	298.01	0.0044	1.85E-05	5.90E+06
17.64	24.67	297.88	0.0044	1.91E-05	5.73E+06
18.28	24.47	297.66	0.0045	2.03E-05	5.43E+06
18.60	24.38	297.57	0.0045	2.09E-05	5.30E+06
18.92	24.31	297.50	0.0045	2.15E-05	5.17E+06
19.24	24.26	297.43	0.0045	2.20E-05	5.05E+06
19.88	24.19	297.35	0.0045	2.31E-05	4.84E+06
20.20	24.18	297.33	0.0045	2.36E-05	4.74E+06
20.52	24.19	297.33	0.0046	2.41E-05	4.66E+06
20.84	24.21	297.35	0.0046	2.46E-05	4.57E+06
21.48	24.31	297.43	0.0046	2.56E-05	4.42E+06
21.80	24.38	297.49	0.0046	2.61E-05	4.35E+06
22.12	24.48	297.58	0.0046	2.65E-05	4.29E+06
22.44	24.59	297.68	0.0046	2.70E-05	4.23E+06
23.08	24.86	297.93	0.0047	2.78E-05	4.12E+06
23.40	25.02	298.09	0.0047	2.82E-05	4.08E+06
23.72	25.21	298.26	0.0047	2.85E-05	4.03E+06
24.04	25.41	298.45	0.0047	2.89E-05	3.99E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-5 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
24.68	25.86	298.89	0.0047	2.96E-05	3.92E+06
25.00	26.12	299.14	0.0047	2.99E-05	3.89E+06
25.32	26.40	299.41	0.0047	3.02E-05	3.87E+06
25.64	26.69	299.69	0.0047	3.05E-05	3.84E+06
26.28	27.34	300.32	0.0048	3.10E-05	3.80E+06
26.60	27.69	300.66	0.0048	3.12E-05	3.78E+06
26.92	28.06	301.02	0.0048	3.14E-05	3.76E+06
27.24	28.44	301.40	0.0048	3.16E-05	3.75E+06
27.88	29.27	302.21	0.0048	3.20E-05	3.73E+06
28.20	29.72	302.64	0.0048	3.22E-05	3.72E+06
28.52	30.18	303.09	0.0048	3.23E-05	3.72E+06
28.84	30.66	303.56	0.0048	3.25E-05	3.71E+06
29.48	31.67	304.56	0.0049	3.27E-05	3.71E+06
29.80	32.20	305.08	0.0049	3.28E-05	3.71E+06
30.12	32.75	305.62	0.0049	3.29E-05	3.71E+06
30.44	33.31	306.18	0.0049	3.30E-05	3.71E+06
31.08	34.49	307.34	0.0049	3.31E-05	3.72E+06
31.40	35.11	307.95	0.0049	3.32E-05	3.73E+06
31.72	35.74	308.57	0.0049	3.32E-05	3.73E+06
32.04	36.39	309.21	0.0049	3.33E-05	3.74E+06
32.68	37.73	310.54	0.0049	3.33E-05	3.76E+06
33.00	38.42	311.22	0.0049	3.34E-05	3.76E+06
33.32	39.13	311.92	0.0049	3.34E-05	3.77E+06
33.64	39.85	312.64	0.0049	3.34E-05	3.78E+06
34.28	41.34	314.11	0.0049	3.34E-05	3.80E+06
34.60	42.10	314.87	0.0049	3.34E-05	3.81E+06
34.92	42.88	315.64	0.0049	3.34E-05	3.81E+06
35.24	43.66	316.42	0.0049	3.34E-05	3.82E+06
35.88	45.28	318.02	0.0049	3.34E-05	3.84E+06
36.20	46.10	318.84	0.0049	3.34E-05	3.84E+06
36.52	46.94	319.67	0.0049	3.34E-05	3.85E+06
36.84	47.78	320.51	0.0049	3.34E-05	3.85E+06
37.48	49.51	322.22	0.0049	3.34E-05	3.85E+06
37.80	50.38	323.09	0.0048	3.34E-05	3.85E+06
38.12	51.27	323.98	0.0048	3.34E-05	3.85E+06
38.44	52.16	324.87	0.0048	3.34E-05	3.85E+06
39.08	53.98	326.67	0.0048	3.34E-05	3.84E+06
39.40	54.90	327.59	0.0047	3.34E-05	3.83E+06
39.72	55.82	328.51	0.0047	3.34E-05	3.82E+06
40.00	56.63	329.78	0.0047	3.34E-05	3.81E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLYMATH Results

Pressure # 55 °C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
V1bub	1.0×10^{-6}	6.911×10^{-7}	3.469×10^{-5}	3.447×10^{-5}
T	10.3257	10.3257	40.832064	40.832064
TK	283.4757	283.4757	313.98206	313.98206
P1bub	0	0	5.665×10^7	3.507×10^6

ODE Report (RKF45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \frac{d(\text{nco2})}{dt} = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

$$[2] \frac{d(\text{V1bub})}{dt} = (-6.2016 \times 10^{-13})t^5 + (7.2049 \times 10^{-11})t^4 - (28.00912 \times 10^{-10})t^3 + (3.62238 \times 10^{-8})t^2 + (11.51902 \times 10^{-9})t - (2.03413 \times 10^{-7})$$

$$[3] \frac{d(T)}{dt} = (-30.26874 \times 10^{-9})t^5 + (9.8488 \times 10^{-6})t^4 - (11.4978 \times 10^{-4})t^3 + (5.69655 \times 10^{-2})t^2 - (10.76982 \times 10^{-1})t + 5.79118$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \text{TK} = T + 273.15$$

$$[2] \text{P1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / \text{V1bub}$$

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess, h = .000001

Truncation error tolerance, eps = .000001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-6 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในห้องก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
0.00	10.33	283.48	0.0000	1.00E-06	0.00E+00
1.00	15.62	287.99	0.0006	8.13E-07	1.42E+07
1.32	17.09	289.52	0.0008	7.67E-07	2.06E+07
1.64	18.48	290.95	0.0009	7.30E-07	2.74E+07
2.28	20.96	293.52	0.0013	6.91E-07	4.09E+07
2.60	22.08	294.68	0.0014	6.92E-07	4.69E+07
2.92	23.11	295.75	0.0016	7.08E-07	5.17E+07
3.24	24.06	296.75	0.0017	7.41E-07	5.49E+07
3.88	25.75	298.50	0.0020	8.57E-07	5.67E+07
4.20	26.48	299.27	0.0021	9.44E-07	5.54E+07
4.52	27.15	299.97	0.0022	1.05E-06	5.33E+07
4.84	27.75	300.61	0.0023	1.17E-06	5.04E+07
5.48	28.77	301.69	0.0025	1.49E-06	4.40E+07
5.80	29.20	302.14	0.0026	1.67E-06	4.08E+07
6.12	29.57	302.54	0.0027	1.88E-06	3.77E+07
6.44	29.89	302.89	0.0028	2.11E-06	3.49E+07
7.08	30.39	303.43	0.0030	2.62E-06	2.97E+07
7.40	30.57	303.63	0.0031	2.91E-06	2.75E+07
7.72	30.71	303.80	0.0032	3.22E-06	2.55E+07
8.04	30.81	303.92	0.0032	3.55E-06	2.37E+07
8.68	30.90	304.04	0.0034	4.26E-06	2.05E+07
9.00	30.90	304.05	0.0035	4.65E-06	1.92E+07
9.32	30.86	304.03	0.0035	5.05E-06	1.80E+07
9.64	30.80	303.98	0.0036	5.47E-06	1.68E+07
10.28	30.59	303.80	0.0037	6.35E-06	1.49E+07
10.60	30.45	303.87	0.0037	6.82E-06	1.41E+07
10.92	30.29	303.52	0.0038	7.30E-06	1.33E+07
11.24	30.10	303.35	0.0038	7.80E-06	1.26E+07
11.88	29.69	302.95	0.0039	8.82E-06	1.13E+07
12.20	29.45	302.72	0.0040	9.35E-06	1.08E+07
12.52	29.21	302.48	0.0040	9.89E-06	1.03E+07
12.84	28.95	302.23	0.0040	1.04E-05	9.82E+06
13.48	28.40	301.69	0.0041	1.16E-05	8.99E+06
13.80	28.12	301.41	0.0041	1.21E-05	8.62E+06
14.12	27.83	301.12	0.0042	1.27E-05	8.27E+06
14.44	27.53	300.83	0.0042	1.33E-05	7.95E+06
15.08	26.93	300.23	0.0043	1.45E-05	7.37E+06
15.40	26.62	299.92	0.0043	1.51E-05	7.11E+06
15.72	26.31	299.62	0.0043	1.57E-05	6.87E+06
16.04	26.01	299.31	0.0043	1.63E-05	6.65E+06
16.68	25.40	298.70	0.0044	1.74E-05	6.24E+06
17.00	25.11	298.40	0.0044	1.80E-05	6.05E+06
17.32	24.81	298.11	0.0044	1.86E-05	5.88E+06
17.64	24.52	297.82	0.0044	1.92E-05	5.71E+06
18.28	23.97	297.26	0.0045	2.03E-05	5.42E+06
18.60	23.70	296.98	0.0045	2.09E-05	5.28E+06
18.92	23.44	296.72	0.0045	2.15E-05	5.15E+06
19.24	23.20	296.47	0.0045	2.20E-05	5.03E+06
19.88	22.73	295.99	0.0045	2.31E-05	4.82E+06
20.20	22.51	295.77	0.0045	2.36E-05	4.72E+06
20.52	22.31	295.56	0.0046	2.42E-05	4.62E+06
20.84	22.12	295.36	0.0046	2.47E-05	4.54E+06
21.48	21.77	295.00	0.0046	2.56E-05	4.38E+06
21.80	21.62	294.84	0.0046	2.61E-05	4.31E+06
22.12	21.48	294.70	0.0046	2.66E-05	4.24E+06
22.44	21.36	294.57	0.0046	2.70E-05	4.17E+06
23.08	21.16	294.36	0.0047	2.79E-05	4.06E+06
23.40	21.09	294.27	0.0047	2.83E-05	4.01E+06
23.72	21.03	294.21	0.0047	2.87E-05	3.96E+06
24.04	20.99	294.16	0.0047	2.91E-05	3.91E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-6 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
24.68	20.96	294.11	0.0047	2.98E-05	3.83E+06
25.00	20.96	294.11	0.0047	3.01E-05	3.80E+06
25.32	20.99	294.13	0.0047	3.05E-05	3.76E+06
25.64	21.04	294.16	0.0047	3.08E-05	3.73E+06
26.28	21.18	294.29	0.0048	3.14E-05	3.68E+06
26.60	21.28	294.38	0.0048	3.16E-05	3.65E+06
26.92	21.40	294.49	0.0048	3.19E-05	3.63E+06
27.24	21.53	294.61	0.0048	3.22E-05	3.61E+06
27.88	21.86	294.92	0.0048	3.26E-05	3.58E+06
28.20	22.05	295.10	0.0048	3.28E-05	3.56E+06
28.52	22.26	295.30	0.0048	3.30E-05	3.55E+06
28.84	22.49	295.52	0.0048	3.32E-05	3.54E+06
29.48	23.00	296.02	0.0049	3.35E-05	3.52E+06
29.80	23.28	296.29	0.0049	3.36E-05	3.52E+06
30.12	23.59	296.58	0.0049	3.38E-05	3.51E+06
30.44	23.90	296.89	0.0049	3.39E-05	3.51E+06
31.08	24.60	297.57	0.0049	3.41E-05	3.50E+06
31.40	24.97	297.93	0.0049	3.42E-05	3.50E+06
31.72	25.36	298.31	0.0049	3.43E-05	3.50E+06
32.04	25.77	298.71	0.0049	3.44E-05	3.50E+06
32.68	26.64	299.57	0.0049	3.45E-05	3.50E+06
33.00	27.10	300.02	0.0049	3.45E-05	3.51E+06
33.32	27.58	300.49	0.0049	3.46E-05	3.51E+06
33.64	28.07	300.97	0.0049	3.46E-05	3.51E+06
34.28	29.10	301.99	0.0049	3.47E-05	3.52E+06
34.60	29.64	302.52	0.0049	3.47E-05	3.52E+06
34.92	30.20	303.07	0.0049	3.47E-05	3.53E+06
35.24	30.77	303.63	0.0049	3.47E-05	3.53E+06
35.88	31.96	304.80	0.0049	3.47E-05	3.54E+06
36.20	32.57	305.41	0.0049	3.47E-05	3.54E+06
36.52	33.20	306.03	0.0049	3.47E-05	3.54E+06
36.84	33.84	306.67	0.0049	3.47E-05	3.54E+06
37.48	35.17	307.98	0.0049	3.47E-05	3.55E+06
37.80	35.85	308.65	0.0048	3.46E-05	3.55E+06
38.12	36.54	309.34	0.0048	3.46E-05	3.54E+06
38.44	37.25	310.04	0.0048	3.46E-05	3.54E+06
39.08	38.69	311.48	0.0048	3.46E-05	3.53E+06
39.40	39.43	312.21	0.0047	3.45E-05	3.53E+06
39.72	40.18	312.95	0.0047	3.45E-05	3.52E+06
40.00	40.83	313.98	0.0047	3.45E-05	3.51E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLYMATH Results

Pressure ที่ 80 °C 04-07-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
V1bub	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	3.75×10^{-5}	3.742×10^{-5}
T	43.6476	25.670596	49.51584	49.51584
TK	316.7976	298.82067	322.66584	322.66584
P1bub	0	0	6.647×10^7	3.32×10^6

ODE Report (RK45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \frac{d(\text{nco2})}{dt} = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

$$[2] \frac{d(\text{V1bub})}{dt} = (-8.47464 \times 10^{-13})t^5 + (10.5678 \times 10^{-11})t^4 - (4.4784 \times 10^{-9})t^3 + (7.03236 \times 10^{-8})t^2 - (2.4741 \times 10^{-7})t + (3.88237 \times 10^{-7})$$

$$[3] \frac{d(\text{T})}{dt} = (-23.21292 \times 10^{-11})t^5 + (7.7206 \times 10^{-9})t^4 + (22.15892 \times 10^{-6})t^3 - (4.13454 \times 10^{-3})t^2 + (2.32344 \times 10^{-1})t - 2.64962$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \text{TK} = \text{T} + 273.15$$

$$[2] \text{P1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / \text{V1bub}$$

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-7 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
0.00	43.65	316.80	0.0000	1.00E-08	0.00E+00
1.00	41.10	314.64	0.0006	2.98E-07	4.95E+07
1.32	40.34	313.87	0.0008	3.58E-07	5.34E+07
1.64	39.60	313.12	0.0009	4.10E-07	5.71E+07
2.28	38.18	311.68	0.0013	5.02E-07	6.31E+07
2.60	37.51	310.99	0.0014	5.47E-07	6.51E+07
2.92	36.86	310.33	0.0016	5.96E-07	6.63E+07
3.24	36.23	309.69	0.0017	6.51E-07	6.65E+07
3.88	35.03	308.47	0.0020	7.89E-07	6.41E+07
4.20	34.46	307.89	0.0021	8.75E-07	6.17E+07
4.52	33.91	307.33	0.0022	9.75E-07	5.87E+07
4.84	33.38	306.80	0.0023	1.09E-06	5.54E+07
5.48	32.39	305.78	0.0025	1.37E-06	4.82E+07
5.80	31.92	305.30	0.0026	1.54E-06	4.46E+07
6.12	31.47	304.84	0.0027	1.73E-06	4.12E+07
6.44	31.04	304.40	0.0028	1.94E-06	3.80E+07
7.08	30.23	303.58	0.0030	2.43E-06	3.22E+07
7.40	29.86	303.19	0.0031	2.70E-06	2.97E+07
7.72	29.50	302.82	0.0032	3.00E-06	2.74E+07
8.04	29.16	302.47	0.0032	3.32E-06	2.53E+07
8.68	28.53	301.83	0.0034	4.02E-06	2.17E+07
9.00	28.24	301.53	0.0035	4.41E-06	2.01E+07
9.32	27.97	301.25	0.0035	4.81E-06	1.87E+07
9.64	27.71	300.99	0.0036	5.24E-06	1.74E+07
10.28	27.25	300.51	0.0037	6.16E-06	1.53E+07
10.60	27.04	300.29	0.0037	6.65E-06	1.43E+07
10.92	26.85	300.09	0.0038	7.15E-06	1.35E+07
11.24	26.67	299.91	0.0038	7.68E-06	1.27E+07
11.88	26.36	299.59	0.0039	8.78E-06	1.13E+07
12.20	26.23	299.45	0.0040	9.35E-06	1.07E+07
12.52	26.11	299.32	0.0040	9.94E-06	1.02E+07
12.84	26.01	299.21	0.0040	1.05E-05	9.65E+06
13.48	25.86	299.03	0.0041	1.18E-05	8.76E+06
13.80	25.79	298.96	0.0041	1.24E-05	8.37E+06
14.12	25.74	298.91	0.0042	1.31E-05	8.00E+06
14.44	25.70	298.87	0.0042	1.37E-05	7.67E+06
15.08	25.67	298.82	0.0043	1.51E-05	7.07E+06
15.40	25.67	298.82	0.0043	1.57E-05	6.80E+06
15.72	25.69	298.83	0.0043	1.64E-05	6.55E+06
16.04	25.72	298.85	0.0043	1.71E-05	6.32E+06
16.68	25.81	298.93	0.0044	1.84E-05	5.91E+06
17.00	25.87	298.99	0.0044	1.91E-05	5.72E+06
17.32	25.96	299.06	0.0044	1.98E-05	5.55E+06
17.64	26.03	299.14	0.0044	2.05E-05	5.38E+06
18.28	26.24	299.33	0.0045	2.18E-05	5.09E+06
18.60	26.35	299.44	0.0045	2.25E-05	4.96E+06
18.92	26.48	299.57	0.0045	2.31E-05	4.83E+06
19.24	26.62	299.70	0.0045	2.38E-05	4.72E+06
19.88	26.93	300.00	0.0045	2.51E-05	4.51E+06
20.20	27.10	300.16	0.0045	2.57E-05	4.41E+06
20.52	27.27	300.33	0.0046	2.63E-05	4.32E+06
20.84	27.46	300.52	0.0046	2.69E-05	4.24E+06
21.48	27.86	300.91	0.0046	2.80E-05	4.09E+06
21.80	28.07	301.12	0.0046	2.86E-05	4.02E+06
22.12	28.30	301.33	0.0046	2.91E-05	3.96E+06
22.44	28.53	301.56	0.0046	2.97E-05	3.90E+06
23.08	29.01	302.04	0.0047	3.07E-05	3.79E+06
23.40	29.27	302.29	0.0047	3.11E-05	3.74E+06
23.72	29.53	302.55	0.0047	3.16E-05	3.70E+06
24.04	29.80	302.81	0.0047	3.20E-05	3.66E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-7 แสดงข้อมูลการคำนวณความดันภายในฟองก๊าซ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	nco2	V1bub	P1bub
(sec)	(°C)	(K)	(mol)	(cm ³)	(atm)
24.68	30.36	303.37	0.0047	3.29E-05	3.59E+06
25.00	30.65	303.66	0.0047	3.33E-05	3.55E+06
25.32	30.95	303.95	0.0047	3.36E-05	3.52E+06
25.64	31.26	304.25	0.0047	3.40E-05	3.50E+06
26.28	31.89	304.88	0.0048	3.46E-05	3.45E+06
26.60	32.21	305.20	0.0048	3.49E-05	3.43E+06
26.92	32.54	305.53	0.0048	3.52E-05	3.42E+06
27.24	32.88	305.86	0.0048	3.55E-05	3.40E+06
27.88	33.57	306.54	0.0048	3.59E-05	3.37E+06
28.20	33.92	306.90	0.0048	3.61E-05	3.36E+06
28.52	34.28	307.25	0.0048	3.63E-05	3.36E+06
28.84	34.64	307.61	0.0048	3.65E-05	3.35E+06
29.48	35.39	308.35	0.0049	3.68E-05	3.34E+06
29.80	35.77	308.73	0.0049	3.69E-05	3.34E+06
30.12	36.15	309.11	0.0049	3.70E-05	3.34E+06
30.44	36.54	309.49	0.0049	3.71E-05	3.34E+06
31.08	37.32	310.28	0.0049	3.73E-05	3.34E+06
31.40	37.72	310.67	0.0049	3.74E-05	3.34E+06
31.72	38.13	311.08	0.0049	3.74E-05	3.34E+06
32.04	38.54	311.48	0.0049	3.74E-05	3.35E+06
32.68	39.36	312.30	0.0049	3.75E-05	3.36E+06
33.00	39.78	312.72	0.0049	3.75E-05	3.36E+06
33.32	40.20	313.14	0.0049	3.75E-05	3.37E+06
33.64	40.63	313.56	0.0049	3.75E-05	3.38E+06
34.28	41.48	314.42	0.0049	3.75E-05	3.39E+06
34.60	41.92	314.85	0.0049	3.75E-05	3.39E+06
34.92	42.35	315.28	0.0049	3.74E-05	3.40E+06
35.24	42.79	315.72	0.0049	3.74E-05	3.40E+06
35.88	43.67	316.60	0.0049	3.74E-05	3.41E+06
36.20	44.12	317.05	0.0049	3.74E-05	3.41E+06
36.52	44.56	317.49	0.0049	3.73E-05	3.41E+06
36.84	45.01	317.94	0.0049	3.73E-05	3.41E+06
37.48	45.92	318.84	0.0049	3.73E-05	3.41E+06
37.80	46.37	319.29	0.0048	3.73E-05	3.41E+06
38.12	46.83	319.75	0.0048	3.73E-05	3.40E+06
38.44	47.28	320.20	0.0048	3.73E-05	3.39E+06
39.08	48.20	321.12	0.0048	3.73E-05	3.37E+06
39.40	48.66	321.58	0.0047	3.74E-05	3.36E+06
39.72	49.12	322.04	0.0047	3.74E-05	3.35E+06
40.00	49.52	322.67	0.0047	3.74E-05	3.32E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ผลการคำนวณคุณสมบัติต่างๆ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

POLYMATH Results

Condition 1: 30 °C

04-11-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
Tcond	30	30	30	30
T	22.01284	22.01284	58.045105	58.045105
TK	295.16284	295.16284	331.19511	331.19511
a	-4.744×10^{-9}	-4.744×10^{-9}	-4.744×10^{-9}	-4.744×10^{-9}
b	1.811×10^{-6}	1.811×10^{-6}	1.811×10^{-6}	1.811×10^{-6}
c	-2.544×10^{-4}	-2.544×10^{-4}	-2.544×10^{-4}	-2.544×10^{-4}
d	0.0157109	0.0157109	0.0157109	0.0157109
e	-0.3879175	-0.3879175	-0.3879175	-0.3879175
f	3.411296	3.411296	3.411296	3.411296
g	22.01284	22.01284	22.01284	22.01284
P1bub	3.807×10^6	3.807×10^6	3.807×10^6	3.807×10^6
V1bub	0	0	3.392×10^{-5}	3.349×10^{-5}
r	0	0	0.0200779	0.0199942
Nbub	2.449×10^4	2.449×10^4	2.449×10^4	2.449×10^4
Vfoamfinal	670.54757	670.54757	670.54757	670.54757
Vfoam	142	142	701.09822	694.1396
D	4.4	4.4	4.4	4.4
A	15.211429	15.211429	15.211429	15.211429
tc	1.6468	1.6468	1.6468	1.6468
x	9.3350864	9.3350864	46.090229	45.632768
tgrowth	1.6468	1.6468	41.6468	41.6468

ODE Report (RK45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \text{d(nco2)/d(t)} = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \text{Tcond} = 30$$

$$[2] \text{T} = \text{a}t^6 + \text{b}t^5 + \text{c}t^4 + \text{d}t^3 + \text{e}t^2 + \text{f}t + \text{g}$$

$$[3] \text{a} = (4.24578 \times 10^{-12}) \text{Tcond}^2 - (3.72932 \times 10^{-10}) \text{Tcond} + (2.62274 \times 10^{-9})$$

$$[4] \text{b} = (-1.70193 \times 10^{-9}) \text{Tcond}^2 + (1.51024 \times 10^{-7}) \text{Tcond} - (1.18799 \times 10^{-6})$$

$$[5] \text{c} = (2.60745 \times 10^{-7}) \text{Tcond}^2 - (2.34833 \times 10^{-5}) \text{Tcond} + (2.15429 \times 10^{-4})$$

$$[6] \text{d} = (-1.89149 \times 10^{-5}) \text{Tcond}^2 + (1.73886 \times 10^{-3}) \text{Tcond} - (1.94315 \times 10^{-2})$$

$$[7] \text{e} = (6.44195 \times 10^{-4}) \text{Tcond}^2 - (6.07800 \times 10^{-2}) \text{Tcond} + (8.55707 \times 10^{-1})$$

$$[8] \text{f} = (-8.65716 \times 10^{-3}) \text{Tcond}^2 + (8.31068 \times 10^{-1}) \text{Tcond} - (13.729310)$$

$$[9] \text{g} = (3.57836 \times 10^{-2}) \text{Tcond}^2 - (2.70047) \text{Tcond} + (70.8217)$$

$$[10] \text{P1bub} = (90.4) \text{Tcond}^2 - (1.96840 \times 10^4) \text{Tcond} + (4.31616 \times 10^6)$$

$$[11] \text{TK} = \text{T} + 273.15$$

$$[12] \text{V1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / \text{P1bub}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

[13] r = ((V1bub*3*7)/(4*22))^(1/3)
[14] Nbub = (-1.6183) Tcond2 + (1.40633x 102) Tcond + (2.17277x104)
[15] Vfoamfinal = (-2.93149x10-3) Tcond2 + 3.81697*10-(1)*Tcond+6.61735*10^(2)
[16] Vfoam = (Nbub*V1bub*Vfoamfinal) + 142
[17] tc = (-0.0023) Tcond2 + (0.2854) Tcond - 4.8452
[18] tgrowth = t + tc
[19] D = 4.4
[20] A = (22*D2) / (7*4)
[21] x = Vfoam/A

```

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-8 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

t	T	TK	a	b	c	d	e	f	g	nco2	P1bub	V1bub	r	Nbub	Vfoamfinal	Vfoam
(sec)	(°C)	(K)								(mol)	(atm)	(cm ³)	(μm)	(cell/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
0.00	22.01	295.16	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0000	3.81E+06	0	0.00	2.45E+04	670.55	142
1.00	24.63	297.78	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0008	3.81E+06	3.24E-06	0.00	2.45E+04	670.55	142
1.32	25.48	298.63	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0008	3.81E+06	4.40E-06	0.00	2.45E+04	670.55	142
1.64	26.27	299.42	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0009	3.81E+06	5.52E-06	0.00	2.45E+04	670.55	142
2.28	27.65	300.80	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0013	3.81E+06	7.67E-06	0.00	2.45E+04	670.55	142
2.60	28.25	301.40	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0014	3.81E+06	8.69E-06	91.75	2.45E+04	670.55	195
2.92	28.80	301.95	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0016	3.81E+06	9.67E-06	101.62	2.45E+04	670.55	214
3.24	29.28	302.43	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0017	3.81E+06	1.06E-05	109.64	2.45E+04	670.55	233
3.88	30.10	303.25	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0020	3.81E+06	1.24E-05	122.31	2.45E+04	670.55	268
4.20	30.44	303.59	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0021	3.81E+06	1.33E-05	127.51	2.45E+04	670.55	285
4.52	30.73	303.88	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0022	3.81E+06	1.41E-05	132.15	2.45E+04	670.55	301
4.84	30.98	304.13	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0023	3.81E+06	1.49E-05	136.34	2.45E+04	670.55	316
5.48	31.35	304.50	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0025	3.81E+06	1.63E-05	143.64	2.45E+04	670.55	346
5.80	31.49	304.64	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0026	3.81E+06	1.70E-05	146.83	2.45E+04	670.55	360
6.12	31.58	304.73	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0027	3.81E+06	1.77E-05	149.78	2.45E+04	670.55	373
6.44	31.65	304.80	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0028	3.81E+06	1.83E-05	152.51	2.45E+04	670.55	386
7.08	31.69	304.84	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0030	3.81E+06	1.95E-05	157.39	2.45E+04	670.55	410
7.40	31.68	304.83	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0031	3.81E+06	2.01E-05	159.57	2.45E+04	670.55	422
7.72	31.63	304.78	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0032	3.81E+06	2.06E-05	161.81	2.45E+04	670.55	433
8.04	31.57	304.72	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0032	3.81E+06	2.11E-05	163.52	2.45E+04	670.55	443
8.68	31.37	304.52	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0034	3.81E+06	2.20E-05	166.96	2.45E+04	670.55	462
9.00	31.25	304.40	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0035	3.81E+06	2.25E-05	168.52	2.45E+04	670.55	471
9.32	31.11	304.26	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0035	3.81E+06	2.29E-05	169.98	2.45E+04	670.55	480
9.84	30.95	304.10	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0038	3.81E+06	2.33E-05	171.35	2.45E+04	670.55	488
10.28	30.61	303.76	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0037	3.81E+06	2.40E-05	173.84	2.45E+04	670.55	504
10.60	30.42	303.57	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0037	3.81E+06	2.43E-05	174.97	2.45E+04	670.55	511
10.92	30.22	303.37	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0038	3.81E+06	2.46E-05	176.03	2.45E+04	670.55	517
11.24	30.01	303.16	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0038	3.81E+06	2.49E-05	177.03	2.45E+04	670.55	524
11.88	29.59	302.74	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0039	3.81E+06	2.55E-05	178.84	2.45E+04	670.55	536
12.20	29.37	302.52	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0040	3.81E+06	2.57E-05	179.87	2.45E+04	670.55	541
12.52	29.15	302.30	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0040	3.81E+06	2.60E-05	180.45	2.45E+04	670.55	546
12.84	28.92	302.07	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0040	3.81E+06	2.62E-05	181.17	2.45E+04	670.55	551
13.48	28.48	301.63	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0041	3.81E+06	2.66E-05	182.50	2.45E+04	670.55	560
13.80	28.26	301.41	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0041	3.81E+06	2.68E-05	183.11	2.45E+04	670.55	565
14.12	28.04	301.19	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0042	3.81E+06	2.70E-05	183.68	2.45E+04	670.55	568
14.44	27.83	300.98	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0042	3.81E+06	2.72E-05	184.21	2.45E+04	670.55	572
15.08	27.41	300.56	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0043	3.81E+06	2.75E-05	185.19	2.45E+04	670.55	579
15.40	27.22	300.37	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0043	3.81E+06	2.78E-05	185.63	2.45E+04	670.55	582
15.72	27.03	300.18	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0043	3.81E+06	2.78E-05	186.06	2.45E+04	670.55	585
16.04	26.85	300.00	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0043	3.81E+06	2.79E-05	186.45	2.45E+04	670.55	588
16.68	26.51	299.66	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0044	3.81E+06	2.82E-05	187.18	2.45E+04	670.55	593
17.00	26.36	299.51	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0044	3.81E+06	2.83E-05	187.51	2.45E+04	670.55	596
17.32	26.22	299.37	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0044	3.81E+06	2.84E-05	187.83	2.45E+04	670.55	598
17.64	26.09	299.24	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0044	3.81E+06	2.85E-05	188.13	2.45E+04	670.55	600
18.28	25.87	299.02	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.87E-05	188.69	2.45E+04	670.55	604
18.60	25.78	298.93	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.88E-05	188.95	2.45E+04	670.55	608
18.92	25.71	298.86	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.89E-05	189.20	2.45E+04	670.55	608
19.24	25.64	298.79	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.90E-05	189.44	2.45E+04	670.55	610
19.88	25.56	298.71	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.92E-05	189.89	2.45E+04	670.55	613
20.20	25.55	298.70	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0045	3.81E+06	2.92E-05	190.10	2.45E+04	670.55	615

ตาราง จ-8 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	a	b	c	d	e	f	g	nco2	P1bub	V1bub	r	Nbub	Vfoamfinal	Vfoam
(sec)	(°C)	(K)								(mol)	(atm)	(cm ³)	(μm)	(cell/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
20.52	25.54	298.69	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.93E-05	190.31	2.45E+04	670.55	616
20.84	25.56	298.71	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.94E-05	190.51	2.45E+04	670.55	618
21.48	25.64	298.79	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.96E-05	190.90	2.45E+04	670.55	621
21.80	25.71	298.86	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.97E-05	191.09	2.45E+04	670.55	622
22.12	25.79	298.94	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.98E-05	191.27	2.45E+04	670.55	623
22.44	25.89	299.04	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0046	3.81E+06	2.98E-05	191.46	2.45E+04	670.55	625
23.08	26.15	299.30	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.00E-05	191.82	2.45E+04	670.55	628
23.40	26.30	299.45	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.01E-05	192.01	2.45E+04	670.55	629
23.72	26.47	299.62	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.02E-05	192.19	2.45E+04	670.55	631
24.04	26.67	299.82	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.03E-05	192.37	2.45E+04	670.55	632
24.68	27.11	300.26	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.04E-05	192.74	2.45E+04	670.55	635
25.00	27.35	300.50	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.05E-05	192.92	2.45E+04	670.55	636
25.32	27.62	300.77	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.06E-05	193.11	2.45E+04	670.55	638
25.64	27.91	301.06	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.07E-05	193.30	2.45E+04	670.55	639
26.28	28.53	301.68	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.09E-05	193.68	2.45E+04	670.55	642
26.60	28.88	302.03	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.10E-05	193.88	2.45E+04	670.55	644
26.92	29.24	302.39	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.11E-05	194.07	2.45E+04	670.55	645
27.24	29.61	302.76	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.12E-05	194.27	2.45E+04	670.55	647
27.88	30.43	303.58	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.14E-05	194.68	2.45E+04	670.55	650
28.20	30.86	304.01	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.15E-05	194.89	2.45E+04	670.55	651
28.52	31.31	304.46	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.16E-05	195.10	2.45E+04	670.55	653
28.84	31.79	304.94	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.17E-05	195.31	2.45E+04	670.55	655
29.48	32.78	305.93	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.20E-05	195.74	2.45E+04	670.55	658
29.80	33.30	306.45	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.21E-05	195.96	2.45E+04	670.55	660
30.12	33.84	306.99	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.22E-05	196.18	2.45E+04	670.55	662
30.44	34.40	307.55	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.23E-05	196.40	2.45E+04	670.55	663
31.08	35.57	308.72	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.25E-05	196.84	2.45E+04	670.55	667
31.40	36.18	309.33	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.26E-05	197.06	2.45E+04	670.55	669
31.72	36.80	309.95	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.27E-05	197.28	2.45E+04	670.55	670
32.04	37.44	310.59	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.28E-05	197.50	2.45E+04	670.55	672
32.68	38.77	311.92	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.30E-05	197.94	2.45E+04	670.55	676
33.00	39.46	312.61	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.31E-05	198.15	2.45E+04	670.55	677
33.32	40.16	313.31	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.32E-05	198.36	2.45E+04	670.55	679
33.64	40.87	314.02	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.33E-05	198.57	2.45E+04	670.55	681
34.28	42.35	315.50	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.35E-05	198.97	2.45E+04	670.55	684
34.60	43.11	316.26	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.35E-05	199.17	2.45E+04	670.55	686
34.92	43.88	317.03	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.36E-05	199.35	2.45E+04	670.55	687
35.24	44.66	317.81	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.37E-05	199.53	2.45E+04	670.55	689
35.88	46.26	319.41	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.38E-05	199.86	2.45E+04	670.55	691
36.20	47.08	320.23	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.38E-05	200.02	2.45E+04	670.55	693
36.52	47.92	321.07	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.39E-05	200.16	2.45E+04	670.55	694
36.84	48.76	321.91	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.39E-05	200.29	2.45E+04	670.55	695
37.48	50.47	323.62	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0049	3.81E+06	3.39E-05	200.51	2.45E+04	670.55	697
37.80	51.35	324.50	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.39E-05	200.60	2.45E+04	670.55	698
38.12	52.23	325.38	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.39E-05	200.67	2.45E+04	670.55	698
38.44	53.12	326.27	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.39E-05	200.73	2.45E+04	670.55	699
39.08	54.93	328.08	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0048	3.81E+06	3.38E-05	200.78	2.45E+04	670.55	699
39.40	55.85	329.00	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.37E-05	200.77	2.45E+04	670.55	699
39.72	56.78	329.93	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.36E-05	200.75	2.45E+04	670.55	699
40.00	58.05	331.20	-4.74E-09	1.81E-06	-2.54E-04	0.02	-0.39	3.41	22.01	0.0047	3.81E+06	3.35E-05	200.70	2.45E+04	670.55	698

POLYMATH Results

Condition 2 : 55 °C

04-11-2547. Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
Tcond	55	55	55	55
T	30.54124	30.54124	61.16561	61.16561
TK	303.69124	303.69124	334.31561	334.31561
a	$-5.045E \times 10^{-9}$	$-5.045E \times 10^{-9}$	$-5.045E \times 10^{-9}$	$-5.045E \times 10^{-9}$
b	1.97×10^{-6}	1.97×10^{-6}	1.97×10^{-6}	1.97×10^{-6}
c	-2.874×10^{-4}	-2.874×10^{-4}	-2.874×10^{-4}	-2.874×10^{-4}
d	0.0189882	0.0189882	0.0189882	0.0189882
e	-0.5385031	0.5385031	-0.5385031	-0.5385031
f	5.791531	5.791531	5.791531	5.791531
g	30.54124	30.54124	30.54124	30.54124
P1bub	3.507×10^6	3.507×10^6	3.507×10^6	3.507×10^6
V1bub	0	0	3.737E-05	3.67E-05
r	0	0	0.0207368	0.0206132
Nbub	2.457×10^4	2.457×10^4	2.457×10^4	2.457×10^4
Vfoamfinal	673.86058	673.86058	673.86058	673.86058
Vfoam	142	142	768.59701	757.45747
D	4.4	4.4	4.4	4.4
A	15.211429	15.211429	15.211429	15.211429
tc	3.8943	3.8943	3.8943	3.8943
x	9.3350864	9.3350864	50.527602	49.795238
tgrowth	3.8943	3.8943	43.8943	43.8943

ODE Report (RK45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \text{d(nco2)/d(t)} = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \text{Tcond} = 55$$

$$[2] T = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g$$

$$[3] a = (4.24578 \times 10^{-12}) \text{Tcond}^2 - (3.72932 \times 10^{-10}) \text{Tcond} + (2.62274 \times 10^{-9})$$

$$[4] b = (-1.70193 \times 10^{-9}) \text{Tcond}^2 + (1.51024 \times 10^{-7}) \text{Tcond} - (1.18799 \times 10^{-6})$$

$$[5] c = (2.60745 \times 10^{-7}) \text{Tcond}^2 - (2.34833 \times 10^{-5}) \text{Tcond} + (2.15429 \times 10^{-4})$$

$$[6] d = (-1.89149 \times 10^{-5}) \text{Tcond}^2 + (1.73886 \times 10^{-3}) \text{Tcond} - (1.94315 \times 10^{-2})$$

$$[7] e = (6.44195 \times 10^{-4}) \text{Tcond}^2 - (6.07800 \times 10^{-2}) \text{Tcond} + (8.55707 \times 10^{-1})$$

$$[8] f = (-8.65716 \times 10^{-3}) \text{Tcond}^2 + (8.31068 \times 10^{-1}) \text{Tcond} - (13.729310)$$

$$[9] g = (3.57836 \times 10^{-2}) \text{Tcond}^2 - (2.70047) \text{Tcond} + (70.8217)$$

$$[10] \text{P1bub} = (90.4) \text{Tcond}^2 - (1.96840 \times 10^4) \text{Tcond} + (4.31616 \times 10^6)$$

$$[11] \text{TK} = T + 273.15$$

$$[12] \text{V1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / \text{P1bub}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

[13] r = ((V1bub*3*7)/(4*22))^(1/3)
[14] Nbub = (-1.6183) Tcond2 + (1.40633x 102) Tcond + (2.17277x104)
[15] Vfoamfinal = (-2.93149x10-3) Tcond2 + 3.81697*10^(-1)*Tcond+6.61735*10^(2)
[16] Vfoam = (Nbub*V1bub*Vfoamfinal) + 142
[17] tc = (-0.0023) Tcond2 + (0.2854) Tcond - 4.8452
[18] tgrowth = t + tc
[19] D = 4.4
[20] A = (22*D2) / (7*4)
[21] x = Vfoam/A

```

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ๑-9 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส

t	T	TK	a	b	c	d	e	f	g	nco2	P1bub	V1bub	r	Nbub	Vfoamfinal	Vfoam
(sec)	(°C)	(K)								(mol)	(atm)	(cm ³)	(μm)	(cell/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
0.00	30.54	303.69	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0000	3.51E+06	0.00E+00	0.00	2.46E+04	673.86	142
1.00	35.06	308.21	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0006	3.51E+06	3.64E-06	0.00	2.46E+04	673.86	142
1.32	36.58	309.73	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0008	3.51E+06	4.95E-06	0.00	2.46E+04	673.86	142
1.64	38.01	311.16	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0009	3.51E+06	6.23E-06	0.00	2.46E+04	673.86	142
2.28	40.59	313.74	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0013	3.51E+06	8.68E-06	0.00	2.46E+04	673.86	142
2.60	41.75	314.90	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0014	3.51E+06	9.85E-06	0.00	2.46E+04	673.86	142
2.92	42.82	315.97	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0016	3.51E+06	1.10E-05	0.00	2.46E+04	673.86	142
3.24	43.81	316.96	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0017	3.51E+06	1.21E-05	0.00	2.46E+04	673.86	142
3.88	45.57	318.72	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0020	3.51E+06	1.42E-05	0.00	2.46E+04	673.86	142
4.20	46.34	319.49	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0021	3.51E+06	1.52E-05	95.38	2.46E+04	673.86	202
4.52	47.04	320.19	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0022	3.51E+06	1.61E-05	105.72	2.46E+04	673.86	224
4.84	47.67	320.82	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0023	3.51E+06	1.70E-05	114.14	2.46E+04	673.86	245
5.48	48.76	321.91	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0025	3.51E+06	1.88E-05	127.48	2.46E+04	673.86	266
5.80	49.21	322.36	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0026	3.51E+06	1.96E-05	132.97	2.46E+04	673.86	305
6.12	49.61	322.76	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0027	3.51E+06	2.03E-05	137.89	2.46E+04	673.86	324
6.44	49.95	323.10	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0028	3.51E+06	2.11E-05	142.34	2.46E+04	673.86	342
7.08	50.50	323.65	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0030	3.51E+06	2.25E-05	150.09	2.46E+04	673.86	377
7.40	50.70	323.85	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0031	3.51E+06	2.31E-05	153.50	2.46E+04	673.86	393
7.72	50.86	324.01	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0032	3.51E+06	2.38E-05	156.64	2.46E+04	673.86	409
8.04	50.98	324.13	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0032	3.51E+06	2.43E-05	159.56	2.46E+04	673.86	424
8.68	51.11	324.26	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0034	3.51E+06	2.55E-05	164.78	2.46E+04	673.86	452
9.00	51.12	324.27	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0035	3.51E+06	2.60E-05	167.12	2.46E+04	673.86	466
9.32	51.10	324.25	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0035	3.51E+06	2.64E-05	169.31	2.46E+04	673.86	479
9.64	51.05	324.20	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0036	3.51E+06	2.69E-05	171.35	2.46E+04	673.86	491
10.28	50.87	324.02	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0037	3.51E+06	2.78E-05	175.05	2.46E+04	673.86	514
10.60	50.74	323.89	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0037	3.51E+06	2.82E-05	176.73	2.46E+04	673.86	525
10.92	50.59	323.74	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0038	3.51E+06	2.85E-05	178.30	2.46E+04	673.86	535
11.24	50.42	323.57	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0038	3.51E+06	2.89E-05	179.77	2.46E+04	673.86	545
11.88	50.02	323.17	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0039	3.51E+06	2.95E-05	182.44	2.46E+04	673.86	563
12.20	49.79	322.94	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0040	3.51E+06	2.98E-05	183.66	2.46E+04	673.86	572
12.52	49.55	322.70	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0040	3.51E+06	3.01E-05	184.80	2.46E+04	673.86	580
12.84	49.30	322.45	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0040	3.51E+06	3.04E-05	185.86	2.46E+04	673.86	588
13.48	48.76	321.91	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0041	3.51E+06	3.08E-05	187.80	2.46E+04	673.86	602
13.80	48.48	321.63	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0041	3.51E+06	3.11E-05	188.69	2.46E+04	673.86	608
14.12	48.19	321.34	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0042	3.51E+06	3.13E-05	189.51	2.46E+04	673.86	614
14.44	47.90	321.05	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0042	3.51E+06	3.15E-05	190.29	2.46E+04	673.86	620
15.08	47.30	320.45	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0043	3.51E+06	3.18E-05	191.69	2.46E+04	673.86	631
15.40	46.99	320.14	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0043	3.51E+06	3.20E-05	192.33	2.46E+04	673.86	636
15.72	46.69	319.84	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0043	3.51E+06	3.21E-05	192.93	2.46E+04	673.86	640
16.04	46.38	319.53	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0043	3.51E+06	3.23E-05	193.49	2.46E+04	673.86	644
16.68	45.77	318.92	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0044	3.51E+06	3.25E-05	194.50	2.46E+04	673.86	652
17.00	45.47	318.62	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0044	3.51E+06	3.26E-05	194.96	2.46E+04	673.86	656
17.32	45.18	318.33	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0044	3.51E+06	3.28E-05	195.39	2.46E+04	673.86	660
17.64	44.89	318.04	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0044	3.51E+06	3.29E-05	195.79	2.46E+04	673.86	663
18.28	44.33	317.48	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3.51E+06	3.31E-05	196.52	2.46E+04	673.86	669
18.60	44.06	317.21	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3.51E+06	3.32E-05	196.86	2.46E+04	673.86	671
18.92	43.79	316.94	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3.51E+06	3.33E-05	197.17	2.46E+04	673.86	674
19.24	43.54	316.69	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3.51E+06	3.33E-05	197.46	2.46E+04	673.86	676
19.88	43.07	316.22	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3.51E+06	3.35E-05	197.99	2.46E+04	673.86	680

ตาราง จ-9 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	a	b	c	d	e	f	g	nco2	P1bub	V1bub	r	Nbub	Vfoamfinal	Vfoam
(sec)	(°C)	(K)								(mol)	(atm)	(cm ³)	(µm)	(cell/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
20.20	42.84	315.99	-5.045E-09	0.00000197	-0.0002874	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0045	3507000	0.00003358	198.2360	24570	673.86	682.41
20.52	42.63	315.78	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.37E-05	198.47	2.46E+04	673.86	684
20.84	42.44	315.59	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.37E-05	198.69	2.46E+04	673.86	686
21.48	42.08	315.23	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.39E-05	199.09	2.46E+04	673.86	690
21.80	41.92	315.07	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.40E-05	199.28	2.46E+04	673.86	691
22.12	41.78	314.93	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.40E-05	199.46	2.46E+04	673.86	693
22.44	41.65	314.80	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0046	3.51E+06	3.41E-05	199.63	2.46E+04	673.86	694
23.08	41.44	314.59	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.42E-05	199.95	2.46E+04	673.86	697
23.40	41.35	314.50	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.43E-05	200.11	2.46E+04	673.86	698
23.72	41.29	314.44	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.44E-05	200.26	2.46E+04	673.86	699
24.04	41.24	314.39	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.45E-05	200.41	2.46E+04	673.86	700
24.68	41.19	314.34	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.46E-05	200.70	2.46E+04	673.86	703
25.00	41.19	314.34	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.47E-05	200.84	2.46E+04	673.86	704
25.32	41.21	314.36	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.48E-05	200.98	2.46E+04	673.86	705
25.64	41.25	314.40	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.48E-05	201.12	2.46E+04	673.86	706
26.28	41.37	314.52	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.50E-05	201.40	2.46E+04	673.86	709
26.60	41.46	314.61	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.51E-05	201.54	2.46E+04	673.86	710
26.92	41.57	314.72	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.52E-05	201.68	2.46E+04	673.86	711
27.24	41.70	314.85	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.52E-05	201.82	2.46E+04	673.86	712
27.88	42.01	315.16	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.54E-05	202.12	2.46E+04	673.86	715
28.20	42.20	315.35	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.55E-05	202.27	2.46E+04	673.86	716
28.52	42.40	315.55	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.56E-05	202.42	2.46E+04	673.86	717
28.84	42.62	315.77	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.57E-05	202.57	2.46E+04	673.86	719
29.48	43.11	316.26	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.59E-05	202.88	2.46E+04	673.86	721
29.80	43.39	316.54	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.60E-05	203.04	2.46E+04	673.86	723
30.12	43.68	316.83	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.61E-05	203.20	2.46E+04	673.86	724
30.44	43.99	317.14	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.61E-05	203.36	2.46E+04	673.86	725
31.08	44.67	317.82	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.63E-05	203.70	2.46E+04	673.86	728
31.40	45.04	318.19	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.64E-05	203.87	2.46E+04	673.86	730
31.72	45.42	318.57	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.65E-05	204.04	2.46E+04	673.86	731
32.04	45.83	318.98	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.66E-05	204.21	2.46E+04	673.86	733
32.68	46.68	319.83	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.67E-05	204.55	2.46E+04	673.86	736
33.00	47.13	320.28	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.68E-05	204.72	2.46E+04	673.86	737
33.32	47.60	320.75	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.69E-05	204.90	2.46E+04	673.86	739
33.64	48.09	321.24	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.70E-05	205.07	2.46E+04	673.86	740
34.28	49.11	322.26	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.71E-05	205.41	2.46E+04	673.86	743
34.60	49.65	322.80	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.72E-05	205.57	2.46E+04	673.86	745
34.92	50.20	323.35	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.72E-05	205.74	2.46E+04	673.86	746
35.24	50.77	323.92	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.73E-05	205.90	2.46E+04	673.86	748
35.88	51.94	325.09	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.73E-05	206.21	2.46E+04	673.86	750
36.20	52.55	325.70	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.74E-05	206.35	2.46E+04	673.86	752
36.52	53.18	326.33	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.74E-05	206.49	2.46E+04	673.86	753
36.84	53.82	326.97	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.74E-05	206.62	2.46E+04	673.86	754
37.48	55.13	328.28	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0049	3.51E+06	3.74E-05	206.87	2.46E+04	673.86	756
37.80	55.81	328.96	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.73E-05	206.97	2.46E+04	673.86	757
38.12	56.50	329.65	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.73E-05	207.07	2.46E+04	673.86	758
38.44	57.20	330.35	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.72E-05	207.15	2.46E+04	673.86	759
39.08	58.65	331.80	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0048	3.51E+06	3.71E-05	207.29	2.46E+04	673.86	760
39.40	59.38	332.53	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.70E-05	207.33	2.46E+04	673.86	760
39.72	60.13	333.28	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.69E-05	207.36	2.46E+04	673.86	761
40.00	61.17	334.32	-5.05E-09	1.97E-06	-2.87E-04	0.02	-0.54	5.79	30.54	0.0047	3.51E+06	3.67E-05	207.37	2.46E+04	673.86	761

POLYMATH Results

Condition 3 : 80 °C

04-11-2547, Rev5.1.233

Calculated values of the DEQ variables

Variable	initial value	minimal value	maximal value	final value
t	0	0	40	40
nco2	0	0	0.0049196	0.004692
Tcond	80	80	80	80
T	83.79914	65.81737	89.630968	89.630968
TK	356.94914	338.96737	362.78097	362.78097
a	-3.883×10^{11}	-3.883×10^{11}	-3.883×10^{11}	-3.883×10^{11}
b	1.578×10^{-9}	1.578×10^{-9}	1.578×10^{-9}	1.578×10^{-9}
c	5.533×10^{-6}	5.533×10^{-6}	5.533×10^{-6}	5.533×10^{-6}
d	-0.0013781	-0.0013781	-0.0013781	-0.0013781
e	0.116155	0.116155	0.116155	0.116155
f	-2.649684	-2.649684	-2.649684	-2.649684
g	83.79914	83.79914	83.79914	83.79914
P1bub	3.32×10^6	3.32×10^6	3.32×10^6	3.32×10^6
V1bub	0	0	4.326E-05	4.207E-05
r	0	0	0.0217742	0.0215728
Nbub	2.262×10^4	2.262×10^4	2.262×10^4	2.262×10^4
Vfoamfinal	692.03624	692.03624	692.03624	692.03624
Vfoam	142	142	819.231	800.60977
D	4.4	4.4	4.4	4.4
A	15.211429	15.211429	15.211429	15.211429
tc	3.2668	3.2668	3.2668	3.2668
x	9.3350864	9.3350864	53.856283	52.632122
tgrowth	3.2668	3.2668	43.2668	43.2668

ODE Report (RK45)

Differential equations as entered by the user

$$[1] \text{d(nco2)/d(t)} = (-3.471812 \times 10^{-8})t^3 + (2.644344 \times 10^{-6})t^2 - (6.81362 \times 10^{-5})t + (6.25198 \times 10^{-4})$$

Explicit equations as entered by the user

$$[1] \text{Tcond} = 80$$

$$[2] \text{T} = \text{a}t^6 + \text{b}t^5 + \text{c}t^4 + \text{d}t^3 + \text{e}t^2 + \text{f}t + \text{g}$$

$$[3] \text{a} = (4.24578 \times 10^{-12}) \text{Tcond}^2 - (3.72932 \times 10^{-10}) \text{Tcond} + (2.62274 \times 10^{-9})$$

$$[4] \text{b} = (-1.70193 \times 10^{-9}) \text{Tcond}^2 + (1.51024 \times 10^{-7}) \text{Tcond} - (1.18799 \times 10^{-6})$$

$$[5] \text{c} = (2.60745 \times 10^{-7}) \text{Tcond}^2 - (2.34833 \times 10^{-5}) \text{Tcond} + (2.15429 \times 10^{-4})$$

$$[6] \text{d} = (-1.89149 \times 10^{-5}) \text{Tcond}^2 + (1.73886 \times 10^{-3}) \text{Tcond} - (1.94315 \times 10^{-2})$$

$$[7] \text{e} = (6.44195 \times 10^{-4}) \text{Tcond}^2 - (6.07800 \times 10^{-2}) \text{Tcond} + (8.55707 \times 10^{-1})$$

$$[8] \text{f} = (-8.65716 \times 10^{-3}) \text{Tcond}^2 + (8.31068 \times 10^{-1}) \text{Tcond} - (13.729310)$$

$$[9] \text{g} = (3.57836 \times 10^{-2}) \text{Tcond}^2 - (2.70047) \text{Tcond} + (70.8217)$$

$$[10] \text{P1bub} = (90.4) \text{Tcond}^2 - (1.96840 \times 10^4) \text{Tcond} + (4.31616 \times 10^6)$$

$$[11] \text{TK} = \text{T} + 273.15$$

$$[12] \text{V1bub} = (\text{nco2} * 82.057 * \text{TK}) / \text{P1bub}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

[13] r = ((V1bub*3*7)/(4*22))^(1/3)
[14] Nbub = (-1.6183) Tcond2 + (1.40633x 102) Tcond + (2.17277x104)
[15] Vfoamfinal = (-2.93149x10-3) Tcond2 + 3.81697*10^(-1)*Tcond+6.61735*10^(2)
[16] Vfoam = (Nbub*V1bub*Vfoamfinal) + 142
[17] tc = (-0.0023) Tcond2 + (0.2854) Tcond - 4.8452
[18] tgrowth = t + tc
[19] D = 4.4
[20] A = (22*D2) / (7*4)
[21] x = Vfoam/A

```

Independent variable

variable name : t

initial value : 0

final value : 40

Precision

Step size guess. h = .000001

Truncation error tolerance. eps = .000001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ-10 แสดงผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ : สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

t	T	TK	a	b	c	d	e	f	g	nco2	P1bub	V1bub	r	Nbub	Vfoamfinal	Vfoam
(sec)	(°C)	(K)								(mol)	(atm)	(cm ³)	(μm)	(cell/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
20.52	67.33	340.48	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0046	3.32E+06	3.83E-05	206.76	2.26E+04	673.51	706
20.84	67.51	340.66	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0046	3.32E+06	3.85E-05	207.34	2.26E+04	673.51	711
21.48	67.90	341.05	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0046	3.32E+06	3.87E-05	207.61	2.26E+04	673.51	713
21.80	68.11	341.26	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.66	83.80	0.0046	3.32E+06	3.88E-05	207.88	2.26E+04	673.51	716
22.12	68.33	341.48	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0046	3.32E+06	3.90E-05	208.15	2.26E+04	673.51	718
22.44	68.55	341.70	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0046	3.32E+06	3.91E-05	208.65	2.26E+04	673.51	722
23.08	69.03	342.18	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	3.93E-05	208.89	2.26E+04	673.51	724
23.40	69.28	342.43	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	3.95E-05	209.13	2.26E+04	673.51	726
23.72	69.54	342.69	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	3.96E-05	209.37	2.26E+04	673.51	728
24.04	69.80	342.95	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	3.97E-05	209.83	2.26E+04	673.51	732
24.68	70.36	343.51	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	3.99E-05	210.06	2.26E+04	673.51	734
25.00	70.65	343.80	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.01E-05	210.28	2.26E+04	673.51	736
25.32	70.94	344.09	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.02E-05	210.50	2.26E+04	673.51	738
25.64	71.24	344.39	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.03E-05	210.94	2.26E+04	673.51	741
26.28	71.87	345.02	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.06E-05	211.16	2.26E+04	673.51	743
26.60	72.19	345.34	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.07E-05	211.38	2.26E+04	673.51	745
26.92	72.51	345.66	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.08E-05	211.59	2.26E+04	673.51	747
27.24	72.85	346.00	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.09E-05	212.02	2.26E+04	673.51	750
27.88	73.53	346.68	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.12E-05	212.24	2.26E+04	673.51	752
28.20	73.88	347.03	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.13E-05	212.45	2.26E+04	673.51	754
28.52	74.24	347.39	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.14E-05	212.67	2.26E+04	673.51	756
28.84	74.60	347.75	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.15E-05	213.09	2.26E+04	673.51	760
29.48	75.33	348.48	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.17E-05	213.31	2.26E+04	673.51	762
29.80	75.71	348.86	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.19E-05	213.52	2.26E+04	673.51	763
30.12	76.09	349.24	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.20E-05	213.73	2.26E+04	673.51	765
30.44	76.47	349.62	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.21E-05	214.15	2.26E+04	673.51	769
31.08	77.26	350.41	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.23E-05	214.36	2.26E+04	673.51	771
31.40	77.65	350.80	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.24E-05	214.56	2.26E+04	673.51	773
31.72	78.06	351.21	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.25E-05	214.77	2.26E+04	673.51	774
32.04	78.46	351.61	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.26E-05	215.17	2.26E+04	673.51	778
32.68	79.28	352.43	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.28E-05	215.37	2.26E+04	673.51	780
33.00	79.70	352.85	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.29E-05	215.56	2.26E+04	673.51	781
33.32	80.12	353.27	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.29E-05	215.75	2.26E+04	673.51	783
33.64	80.54	353.69	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.30E-05	216.11	2.26E+04	673.51	786
34.28	81.39	354.54	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.31E-05	216.29	2.26E+04	673.51	788
34.60	81.83	354.98	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.32E-05	216.45	2.26E+04	673.51	789
34.92	82.26	355.41	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.32E-05	216.61	2.26E+04	673.51	791
35.24	82.70	355.85	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.32E-05	216.91	2.26E+04	673.51	794
35.88	83.58	356.73	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.33E-05	217.05	2.26E+04	673.51	795
36.20	84.02	357.17	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.33E-05	217.18	2.26E+04	673.51	796
36.52	84.46	357.61	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.33E-05	217.29	2.26E+04	673.51	797
36.84	84.91	358.06	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.32E-05	217.49	2.26E+04	673.51	799
37.48	85.81	358.96	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0049	3.32E+06	4.31E-05	217.57	2.26E+04	673.51	800
37.80	86.26	359.41	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.31E-05	217.64	2.26E+04	673.51	800
38.12	86.72	359.87	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.30E-05	217.69	2.26E+04	673.51	801
38.44	87.17	360.32	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.29E-05	217.74	2.26E+04	673.51	801
39.08	88.09	361.24	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0048	3.32E+06	4.27E-05	217.74	2.26E+04	673.51	801
39.40	88.54	361.69	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.25E-05	217.72	2.26E+04	673.51	801
39.72	89.00	362.15	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.23E-05	217.68	2.26E+04	673.51	801
40.00	89.63	362.78	-3.88E-11	1.58E-09	5.53E-06	0.00	0.12	-2.65	83.80	0.0047	3.32E+06	4.21E-05	217.54	2.26E+04	673.51	799

POLYMATH 5.1 - [Ordinary Differential Equations Solver]

File Edit Program Window Examples Help

Open Save LEQ NLE DEQ REG Calculate Units Const Setup

Indep Var t Initial Value 0

Solve with RK45 Final Value 40

Table Graph Report Comments

Add DE Add EE Remove Edit

Differential equations / explicit equations	Initial value	Comments
1 $d[Nco2]/dt = -3.471812 \cdot 10^{-12} \cdot [C]^{1.3} + 2.644344 \cdot 10^{-16} \cdot [C]^{1.2} + 6.8132 \cdot 10^{-15} \cdot [C] + 6.25198 \cdot 10^{-4}$	0	Nco2 คือ จำนวนโมลของ CO2
2 $TK = T + 273.15$	n.a.	
3 $V1bub = (Nco2 \cdot 0.057 \cdot TK) / P1bub$	n.a.	V1bub คือ ปริมาตรของฟองแก๊สในหน่วย cm ³
4 $r = ((V1bub \cdot 3 \cdot 7)^{1/4} \cdot 2)^{1/2}$	n.a.	r คือ รัศมีของฟองแก๊ส CO2 ในหน่วย cm
5 $T = a \cdot [C]^6 + b \cdot [C]^5 + c \cdot [C]^4 + d \cdot [C]^3 + e \cdot [C]^2 + f \cdot [C] + g$	n.a.	
6 $a = 4.24578 \cdot 10^{-12} \cdot Tcond^2 - 3.72932 \cdot 10^{-10} \cdot Tcond + 2.62274 \cdot 10^{-9}$	n.a.	
7 $b = -1.70193 \cdot 10^{-10} \cdot Tcond^2 + 1.51024 \cdot 10^{-7} \cdot Tcond - 1.18735 \cdot 10^{-6}$	n.a.	
8 $c = 2.60745 \cdot 10^{-7} \cdot Tcond^2 - 2.34633 \cdot 10^{-5} \cdot Tcond + 2.15429 \cdot 10^{-4}$	n.a.	
9 $d = -1.89149 \cdot 10^{-5} \cdot Tcond^2 + 1.73886 \cdot 10^{-3} \cdot Tcond - 1.94315 \cdot 10^{-2}$	n.a.	
10 $e = 6.44195 \cdot 10^{-4} \cdot Tcond^2 - 6.07800 \cdot 10^{-2} \cdot Tcond + 8.55707 \cdot 10^{-1}$	n.a.	
11 $f = -9.65716 \cdot 10^{-3} \cdot Tcond^2 + 8.31068 \cdot 10^{-1} \cdot Tcond - 1.37253 \cdot 10^1$	n.a.	
12 $g = 3.57836 \cdot 10^{-2} \cdot Tcond^2 - 2.70047 \cdot 10^0 \cdot Tcond + 7.08217 \cdot 10^1$	n.a.	
13 $P1bub = 9.04000 \cdot 10^{-11} \cdot Tcond^2 - 1.96840 \cdot 10^{-4} \cdot Tcond + 4.31616 \cdot 10^{-6}$	n.a.	P1bub คือ ความดัน (atm) ที่ระเหยที่ 40
14 $A = (2 \cdot D^2)^{1/4}$	n.a.	
15 $Vfoam = (N1bub \cdot V1bub \cdot Vfoamfinal) / 142$	n.a.	
16 $Vfoamfinal = -2.93149 \cdot 10^{-3} \cdot Tcond - 3.81637 \cdot 10^{-1} \cdot Tcond + 6.51735 \cdot 10^2$	n.a.	
17 $N1bub = -1.6183 \cdot Tcond^2 + 1.40633 \cdot 10^2 \cdot Tcond + 2.17277 \cdot 10^4$	n.a.	
18 $tc = -0.0023 \cdot Tcond^2 + 0.2654 \cdot Tcond - 4.8452$	n.a.	
19 $x = Vfoam / A$	n.a.	
20 $tg = t \cdot hc$	n.a.	
21 $D = 4.4$	n.a.	
22 $Tcond = 80$	n.a.	Tcond คือ อุณหภูมิที่ระเหย

Differential Equations: 1 Auxiliary Equations: 21
Simulation Model edit2.pol No Title 21.20 11/14/2547 NUM

รูป จ-1 ลักษณะการใช้งานโปรแกรมพอดิเมท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้