การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการอบอ่อน

นางสาววันวิสาข์ เข็มเงิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN GLASS CONTAINERS IN ANNEALING PROCESS

Ms.Wanwisa Khemngern

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการอบอ่อน
โดย	นางสาววันวิสาข์ เข็มเงิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิดิศ หนูทอง)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกร รามกุล)

วันวิสาข์ เข็มเงิน: การจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการอบอ่อน. (SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN GLASS CONTAINERS IN ANNEALING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 163 หน้า.

กระบวนการอบอ่อนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช่วยคายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วที่เกิดจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อน เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใส จากผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยผ่านแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษา พบว่าค่าอุณหภูมิที่ทำนายได้มีค่าสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการผลิตจริง โดยแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนซึ่งใช้อัตราการคายความร้อนที่ต่ำและคงที่ในช่วงขอบเขตการอบอ่อนสามารถช่วยลดค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนได้ ผลที่ได้จากการพัฒนาแบบอุณหภูมิทำให้พลังงานที่ใช้ในการอบอ่อนลดลงมากกว่าการใช้แบบอุณหภูมิอบอ่อนแบบอื่น ๆ ที่ได้ทำการศึกษาและยังได้คุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์แก้วอยู่ในเกณฑ์กำหนด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบอ่อน ในกรณีที่บรรจุภัณฑ์แก้วมีการกระจายตัวของความหนาสม่ำเสมอกันจะทำให้ค่าความเค้นที่ได้เพิ่มขึ้นตามความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าบรรจุภัณฑ์แก้วมีการกระจายตัวของความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกันค่าความเค้นที่ได้จะเกิดขึ้นมากที่สุด ณ ตำแหน่งที่บรรจุภัณฑ์แก้วมีความแตกต่างของความหนามากที่สุด

ภาควิชา......วิศวกรรมเคมี...... ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา......วิศวกรรมเคมี...... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก......................

ปีการศึกษา......2555......

5271502021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : GLASS ANNEALING/ STRESS/ SIMULATION OF TEMPERATURE PROFILE

WANWISA KHEMNGERN: SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN GLASS CONTAINERS IN ANNEALING PROCESS. ADVISOR : ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 163 pp.

The annealing process is important for glass container production, it releases stress established during the high temperature forming process. In this thesis, dynamic mathematical model is developed and validated to predict characteristic of temperature profiles and stress in flint glass container. The result is simulated by developed model and software, from research that find predicted value is consistent with temperature from real production. Temperature profile in annealing process is determined by using low constant cooling rate in annealing region. Thus, the maximum temperature required in annealing process decrease. Consequently, the annealing profile requires lower energy consumption than those of other existing annealing profiles, while all constraints are still satisfied. Furthermore, the effects of glass thickness on stress occured during annealing are studied. In case of uniformly distributed thickness, stress increases with increasing of thickness. In contrast, in case of non uniform thickness the maximum stress occurs at the point where the change of thickness is maximum.

Department : Chemical Engineering Student's Signature …………………………..

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature …………………………..

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการอบรมสั่งสอนในการปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทางในการพัฒนางานวิจัยและความช่วยเหลือในด้านอื่น ๆ มาโดยตลอดจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิดิศ หนูทอง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกร รามกุล ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางกอกกล๊าส จำกัด คุณศิริพร ไกรลาศศิริ ผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ คุณโสรส เกตุวงศ์ นักวิจัยด้านฟิสิกส์ และพี่ ๆ พนักงานทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ ข้อมูลและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านด้วยดีตลอดมา

ขอบคุณเพื่อนรุ่นพี่และรุ่นน้อง สำหรับความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้านและกำลังใจที่มีให้ในการทำงานวิจัยเสมอมา

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย………………………………………………………………………. ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…………………………………………………………….…….. จ
กิตติกรรมประกาศ……………………………………………………………………… ฉ
สารบัญ……………………………………………………………………….............. ช
สารบัญตาราง…………………………………………………………………………… ฌ
สารบัญรูป……………………………………………………………………………….. ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ…………………………………………………………… น
บทที่
1 บทนำ……………………………………………………………………………… 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา…………………………………………………………... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย………………………………………………………….. 1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย…………………………………………………………………..... 1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย…………………………………………………….. 2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย……………………………………………………………… 2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……………………………………………………... 3
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง…………………………………………………………………… 8
3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นและประเภทของแก้ว…………………………………………... 8
3.2 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตบรรจุภัณแก้ว………………………………………… 9
3.3 เตาอบอ่อน…………………………………………………………………………… 18
3.4 กรรมวิธีทางความร้อน……………………………………………………………….. 19
3.5 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ…………………………………………………………….. 25
3.6 การถ่ายเทความร้อน………………………………………………………………….. 33
3.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม…………………………………………………… 38
4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์……………………………………………………………. 44
5 แบบอุณหภูมิอบอ่อน………………………………………………………………….... 47
6 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย……………………………………………............ 50

บทที่ หน้า

6.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการอบอ่อน………… 51

6.2 การออกแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้ว………………………… 68

6.3 การศึกษาปัจจัยด้านความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบอ่อน……………………………………………………….. 99

7 สรุปผลการวิจัย……………………………………………………………………… 122

7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัต……………………………..... 122

7.2 การพัฒนาแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อน………………………….. 122

7.3 การศึกษาปัจจัยด้านความหนาที่ส่งผลต่อความเค้นในกระบวนการอบอ่อน……... 123

รายการอ้างอิง…………………………………………………………………………… 124

ภาคผนวก……………………………………………………………………............ 126

ภาคผนวก ก……………………………………………………………………… 127

ภาคผนวก ข……………………………………………………………………… 129

ภาคผนวก ค……………………………………………………………………… 130

ภาคผนวก ง……………………………………………………………………… 160

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……………………………………………………………… 163

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน………………………………………………………. 36

6.1 ลักษณะทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใส……………………………………… 49

6.2 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……... 91

6.3 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……….. 95

6.4 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……... 98

6.5 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……………………………………………………………… 103

6.6 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……………………………………………………………… 106

6.7 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาตร์ที่พัฒนาขึ้น………………………………………………………………… 110

6.8 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……………………………………………… 114

6.9 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……………………………………………… 117

6.10 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากทางแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น……………………………………………… 121

ก-1 ค่าคงที่ต่าง ๆ……………………………………………………………….... 127

ตารางที่ หน้า

ก-2 แบบอุณหภูมิอบอ่อนและค่าความจุความร้อนของขวดแก้วสีใส…………………...... 127

ข-1 อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ที่ผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา มม 3. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 129

ค-1 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A มม 3 ที่ความหนา. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 130

ค-2 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 131

ค-3 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 132

ค-4 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 133

ค-5 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 134

ค-6 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 135

ค-7 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 136

ค-8 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 137

ค-9 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP……………………………………………………………. 138

ค-10 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR…………………………………………………………. 139

ค-11 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR……………………………………………………….... 140

ค-12 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR……………………………………………………….... 141

ตารางที่		หน้า
ค–13	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	142
ค–14	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	143
ค–15	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	144
ค–16	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	145
ค–17	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	146
ค–18	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	147
ค-19	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	148
ค–20	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	149
ค–21	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	150
ค–22	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 1-1-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	151
ค–23	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 1-1-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	152
ค-24	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 1-1-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	153
ค–25	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT…….	154
ค–26	การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT……..	155

ตารางที่ หน้า

ค–27 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT…….. 156

ค-28 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT…….. 157

ค–29 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT…….. 158

ค-30 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT…….. 159

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ลักษณะทางกายภาพของเตาอบอ่อน………………………………………………………..	18
3.2	ลักษณะของพัดลม……………………………………………………………………..	19
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบแผ่นแก้วที่ความหนา ¼ นิ้ว………..	23
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของแก้วชนิดต่าง ๆ……………………..	24
3.5	ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ…………………………………………………….	25
3.6	ความเค้นความเครียด Stress-Strain Curve แบบมีจุดคราก (Yield Point)……………...	27
3.7	เส้นโค้งความเค้น ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก……………………………………...	28
3.8	เส้นโค้งความเค้น ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก………………………	29
3.9	Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ……………………………….	31
3.10	เส้นโค้งความคืบ………………………………………………………………………….	31
3.11	เส้นโค้งความคืบที่สภาวะต่างกัน………………………………………………………….	32
3.12	การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด X…………………………………………	35
3.13	การพาความร้อนในชั้นชิดผิวความร้อนและชั้นชิดผิวความเร็ว………………………..	36
3.14	การแผ่รังสีควานร้อนแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ……..	37
3.15	การแบ่งเอลิเมนต์ในลักษณะในวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์………………………………	41
4.1	บรรจุภัณฑ์แกนสมมาตรแบบสองมิติแกน r และ z……..……………………………..	44
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ AGR……………………..	47
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ IP………………………..	48
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ DT……………………….	49
6.1	การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที………..	52
6.2	การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164วินาที…………	53
6.3	การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที………..	54
6.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	55
6.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Cจากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP	

รูปที่		หน้า
	ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที………	56
6.6	การกระจายตัวของอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	57
6.7	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก……………………..	58
6.8	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………………………	58
6.9	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……………………	59
6.10	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน……………………..	59
6.11	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก…………………..	60
6.12	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน…………………….	60
6.13	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก……………………..	61
6.14	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………………………	62
6.15	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก…………………….	62
6.16	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน………………………	63
6.17	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก…………………..	63
6.18	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน…………………….	64
6.19	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่	

รูปที่		หน้า
	พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก……………………	65
6.20	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………………………..	65
6.21	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……………………..	66
6.22	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน………………………	66
6.23	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก……………………	67
6.24	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………………………	67
6.25	แบบอุณหภูมิที่ศึกษาในกระบวนการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้ว………………………..	69
6.26	การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 50 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที…………	70
6.27	การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	71
6.28	การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 50 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที…………	72
6.29	การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	73
6.30	การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 20 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที…………	74
6.31	การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	75
6.32	การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที………	76
6.33	การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที………	77

รูปที่ หน้า

6.34 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที……… 78

6.35 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที……… 79

6.36 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที……… 80

6.37 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาท b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที……… 81

6.38 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที……… 82

6.39 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที……… 83

6.40 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Cจากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที……… 84

6.41 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาท b) 500 วินาที c) 1300 วินาที……… 85

6.42 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที……… 86

6.43 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก……… 87

6.44 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………… 88

6.45 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……… 89

6.46 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน……… 89

6.47 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก….. 90

รูปที่		หน้า
6.48	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………	90
6.49	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก………	91
6.50	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………..	92
6.51	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……..	92
6.52	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน……….	93
6.53	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก…….	93
6.54	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………	94
6.55	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก………	94
6.56	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………..	95
6.57	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……..	96
6.58	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน……….	96
6.59	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก…….	97
6.60	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จาแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………	97
6.61	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่ง	

รูปที่		หน้า
	ไหล่ด้านนอก………………………………………………………………….	98
6.62	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน…………………………………………………………………...	100
6.63	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก…………………………………………………………………	100
6.64	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน…………………………………………………………………..	101
6.65	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก………………………………………………………………	101
6.66	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน…………………………………………………………………	102
6.67	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก…………………………………………………………………	102
6.68	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน…………………………………………………………………..	103
6.69	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก…………………………………………………………………	104
6.70	การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน…………………………………………………………………..	104

รูปที่ หน้า

6.71 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก…………………………………………………………………. 105
6.72 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………………………………………………………………… 105
6.73 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก………………………………………………………………… 106
6.74 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน………………………………………………………………….. 107
6.75 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……………………………………………………………….. 107
6.76 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน…………………………………………………………………. 108
6.77 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก……………………………………………………………….. 108
6.78 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม. และ4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน………………………………………………………………… 109
6.79 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก…………………………………………………………. 109
6.80 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม.,

รูปที่		หน้า

2-2-4 มม. และ 3-3- 4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน…………………………………………………………….. 111

6.81 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก…………………………………………………………. 111

6.82 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน……………………………………………………………. 112

6.83 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก……………………………………………………….. 112

6.84 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน…………………………………………………………… 113

6.85 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก………………………………………………………… 114

6.86 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน…………………………………………………………….. 115

6.87 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……………………………………………………….. 115

6.88 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B

รูปที่ หน้า

ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน………………………………………………………………. 116
6.89 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก……………………………………………………………. 116
6.90 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน……………………………………………………………… 117
6.91 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก……………………………………………………………… 118
6.92 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน……………………………………………………………….. 118
6.93 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก……………………………………………………………. 119
6.94 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน………………………………………………………………. 119
6.95 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก……………………………………………………………. 120
6.96 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน…………………………………………………………….. 120
ง-1 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP……………………………………... 160
ง-2 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR…………………………………….. 161
ง-3 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT………………………………………. 162

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Nomenclature

$\mathbf{C_p}$	ค่าความจุความร้อน (J/kg K)
k	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
q	พลังงานความร้อน (J/m^2)
R	รัศมี (mm)
Z	ความสูง (mm)
T	อุณหภูมิ (°C)
t	เวลา (s)
v	ความเร็ว (m/s)
u	การกระจัด (m)

Greek Symbols

ε	ค่าการแผ่รังสีความร้อน
ρ	ความหนาแน่นของ (kg/m^3)
θ	แนวแกน θ

Subscript

cnd	การนำความร้อน
cnv	การพาความร้อน
rad	การแพร่รังสีความร้อน
i	รัศมีภายใน
o	รัศมีภายนอก
s	พื้นผิว
a	บรรยากาศโดยรอบ
r	แนวแกนรัศมี
z	แนวแกนความสูง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสากรรมหนึ่งที่มีบทบาทและความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศเพราะอุตสาหกรรมแก้วเป็นพื้นฐานในการเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มและอุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น โดยในที่นี้จะเน้นถึงอุตสาหกรรมแก้วที่เป็นบรรจุภัณฑ์เป็นหลักซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความต้องการภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่และโอกาสขยายตัวในอนาคตยังมีอยู่มากโดยในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วนั้นเตาอบนับเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งมีหน้าที่ช่วยลดความเค้นคงค้างของแก้ว ทำให้แก้วมีความแข็งแรงและไม่แตกง่ายเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศภายนอกหลังการขึ้นรูป ปัญหาที่พบในกระบวนการอบเพื่อลดความเค้นคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างของบรรจุภัณฑ์แก้วและปัญหามลพิษที่ปล่อยมาจากเตา ซึ่งในที่นี้จะเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาอบด้วยการสร้างแบบจำลองกระบวนการเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นภายในเนื้อแก้วและ ณ ตำแหน่งและช่วงเวลาต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์ที่เป็นทรงกระบอก เพื่อให้ได้แก้วที่มีคุณสมบัติที่ดีและหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสต์เชิงพลวัตของกระบวนการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้ว

2) เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของบรรจุภัณฑ์แก้วโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

3) เพื่อพัฒนาแบบอุณหภูมิในการอบอ่อนโดยเปรียบเทียบกับความเค้นที่ได้จากแบบจำลองของอุณหภูมิอบอ่อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง

4) เพื่อศึกษาความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วทั้งแบบความหนาสม่ำเสมอและความหนาไม่สม่ำเสมอที่ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบอ่อน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1) บรรจุภัณฑ์แก้วที่ทำการศึกษา คือ บรรจุภัณฑ์แก้วทรงกระบอกสีใส

2) ความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ทำการศึกษามีดังนี้ 2-2-2, 3-3-3, 1-1-4, 2-2-4, 3-3-4, 4-4-4 มม. (ความหนาไหล่-ลำตัว-ก้น)

3) เชื้อเพลิงที่ใช้ในปฏิกิริยาเผาไหม้ คือ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

4) เตาอบอ่อนแก้วที่ใช้ในการศึกษามีความยาวของช่วงการอบอ่อน 15.75 ม. กว้าง 1.8 ม.

5) โปรแกรมที่ใช้สร้างแบบจำลองเป็นโปรแกรมที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นพื้นฐาน

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมการอบอ่อนได้

2) แบบอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการอบอ่อน

3) ผลของความหนาที่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นในกระบวนการอบอ่อน

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1) ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการผลิตของโรงงาน

2) เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจากโรงงานเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3) สร้างแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นพื้นฐาน

4) ประเมินและปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

5) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการพร้อมทั้งปรับปรุงกระบวนการอบให้ดียิ่งขึ้น

6) นำเสนอแบบจำลองและกระบวนการที่ปรับปรุงขึ้นเพื่อพิจารณาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงของโรงงาน

7) รายงานผลการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกียวข้องที่ใช้เป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาทฤษฎี และแนวทางในการทำงานวิจัย โดยเอกสารและงานวิจัยที่ทำการศึกษามีดังต่อไปนี้ในปี 2000 Michael และ Rainer [1] ได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการอบอ่อนของคริสตัล GaAs ซึ่งในที่นี้ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง 2 วิธีคือ 1. 2D Model (2DM) และ 2. Reduced order model (ROM) ซึ่งการทดลองทั้ง 2 วิธีมีรายละเอียดดังนี้

1. 2D Model (2DM) รูปทรงเรขาคณิตที่ในงานวิจัยนี้เป็นทรงกระบอกแบบสมมาตร และระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้คือ

$$\rho\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}}-\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rk(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right]-\frac{\partial}{\partial z}\left[k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right]=0$$

จาก ρ คือความหนาแน่น, T คือ อุณหภูมิ, k(T) คือ ค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิใน แนวแกนของรัศมีและแนวแกน Z ของขวดแก้ว โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$-\mathrm{k(T)}\frac{\partial T}{\partial n}+2\pi\int_{\Gamma_v} w(.,s)\,\lambda(s)\mathrm{rds} = \lambda\ \mathrm{on}\Gamma_v$$

$$\lambda-(1-\varepsilon)2\pi\int_{\Gamma_v} w(.,s)\,\lambda(s)\mathrm{rds} = \varepsilon\sigma \mathrm{T}^4\mathrm{on}\Gamma_v$$

$$\mathrm{h(T)} = \int_{\Gamma_v}^{T} c_p(\tau)d\tau, T(.,0) = \mathrm{T}_0$$

$$\mathrm{T(.,t)} = \mathrm{T}_d(.,t)\text{at the inner ceramic wall}$$

w (u,s) เป็นปริมาณที่มองเห็นได้ในแกนสมมาตร ซึ่ง u,s เป็นสมาชิกของ Γ_v โดย Γ_v เป็นส่วนหนึ่งในเงื่อนไขขอบเขตในการแผ่รังสี, λ จะเรียกว่า ‘ radiosity ’ ส่วน ε และ σ คือค่าการแผ่รังสีความร้อนและการดูดกลืนสำหรับสมการในการหาเทนเซนร์ความเค้น (Stress Tensor) ของวัสดุแข็ง

ในที่นี้จะใช้กฎของการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งและสองของ Cauchy ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho u_r) = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}\sigma_{rz} - \frac{1}{r}\sigma_{\varphi\varphi} + f_r$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho u_z) = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}\sigma_{zz} + f_r$$

ความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียด มีดังนี้

$$\begin{pmatrix}\sigma_{rr}\\ \sigma_{\varphi\varphi}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{rz}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} & 0\\ c_{12} & c_{22} & c_{32} & 0\\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0\\ 0 & 0 & 0 & c_{44}\end{pmatrix} \times \begin{pmatrix}\varepsilon_{rr} - \alpha(T - T_{ref})\\ \varepsilon_{\varphi\varphi} - \alpha(T - T_{ref})\\ \varepsilon_{zz} - \alpha(T - T_{ref})\\ \varepsilon_{rz}\end{pmatrix}$$

α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และความสัมพันธ์ระหว่าง u_r, u_zและ เทนเซอร์ความเครียด (ε) มีดังนี

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial \mu_r}{\partial z}, \qquad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{\mu_r}{r}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial \mu_z}{\partial z}, \qquad \varepsilon_{rz} = \frac{\partial \mu_r}{\partial r} + \frac{\partial \mu_z}{\partial r}$$

ส่วนสมการท้ายสุดที่ใช้คำนวณความเค้นจะใช้สมการความเค้นของ Mises (σ_{Mises})

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{\varphi\varphi} - \sigma_{zz})^2 + 6\sigma_{rz}^2}{2}}$$

โดย σ_{rr},σ_{zz} , $\sigma_{\varphi\varphi}$เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกน r ,แกนz และ แกน φ

2. Reduced order model (ROM) วิธีนี้จะช่วยลดเวลาและความจุในการทำงานของคอมพิวเตอร์ได้ โดยในที่นี้จะไม่สนใจสมการของCauchyและจะใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวรัศมีของคริสตัลเป็นตัวบ่งชี้ความยืดหยุ่นความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ สมมุติให้คริสตัลมีความยาวมาก ๆ เมื่อเทียบกับแนวรัศมี และใช้ T_{max} เป็นอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีรอบ ๆ วัสดุ สมการที่ได้จึงเป็นดังนี้

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) = 0$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$0 \leq \mathrm{r} \geq \mathrm{R}, \quad 0 \leq \mathrm{t} \geq \mathrm{t}_{\mathrm{end}}$$

$$\mathrm{k}(\mathrm{T}) \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{r}}(0, \mathrm{t}) = 0$$

$$-\mathrm{k}(\mathrm{T}) \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{r}}(\mathrm{R}, \mathrm{t}) = \sigma\varepsilon(\mathrm{T}^4(\mathrm{R}, \mathrm{t}) - \mathrm{T}_{\mathrm{max}}^4(\mathrm{t}))$$

$$\mathrm{T}(\mathrm{r}, \mathrm{t}) = \mathrm{T}_0$$

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทำนายได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี ROM (8 วินาที) จะเร็วกว่า วิธี 2DM (8 ชั่วโมง) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการอบอ่อนของคริสตัลที่ได้จากแบบจำลองจะสูงกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริงในช่วงแรก ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าในการถึงทำให้ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่เซตไว้เพื่อช่วยในการลดความเค้นที่เกิดจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ส่วนในเรื่องความเค้นที่ได้จากแบบจำลองจะน้อยกว่าความเค้นที่วัดได้จริงและจำใช้เวลาในการลดความเค้นน้อยกว่าของจริง

ในปี 2003 B. I. Margoils [2] ได้ศึกษาวิธีการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในแก้วทรงกระบอกโดยได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการคำนวณทางตัวเลขกับวิธีการวิเคราะห์ แบบจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยวิธีการวิเคราะห์ในที่นี้จะไม่คิดการนำความร้อนด้วยการแผ่รังความร้อนในเนื้อแก้ว ดังนั้นสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลในรูปพิกัดทรงกระบอกเป็นดังนี้

$$\frac{\partial T(r,h,\tau)}{\partial \tau} = a\left[\frac{\partial^2 T(r,h,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T(r,h,\tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 (r,h,\tau)}{\partial h^2}\right]$$

$T(r,h,\tau)$คืออุณหภูมิที่จุดพิกัดตามแนวรัศมี r และความสูง hณ เวลาaคือ ความการนำความร้อนของแก้ว (m^2/sec)วิธีการนี้คือจะได้ข้อมูลที่เป็นจริงของการกระจายตัวของอุณหภูมิในจุดหนึ่ง ๆ ณ เวลานั้น ๆ แต่ถ้าเป็นการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิที่อยู่ในรูปพาลาโบลา คือเปลี่ยนจากพาราโบลาเป็นโพลีโนเมียล ที่มีขอบเขตเงื่อนไขคุณสมบัติของแก้วเช่น ค่าการนำความร้อนเป็นอิสระกับเวลา จะแก้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ได้ยากมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีเชิงตัวเลขมาช่วยแก้ปัญหา ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วย วิธีนี้จะช่วยให้ใช้เวลาน้อยในการคำนวณและทำให้ทราบถึงการกระจายตัว ณ เวลานั้น ๆ ในขณะเดียวกันก็จะทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิก่อนเวลาที่ต้องการด้วย โดยวิธีนี้จะใช้สมการการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนในการคำนวณ การคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขเหมาะสมมากกว่าวิธีการวิเคราะห์แก้วที่มีรูปร่างต่าง ๆ กันและเงื่อนไขการแลกเปลี่ยนความร้อนที่

ค่อนข้างซับซ้อน ดังนี้จึงแนะนำให้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในแก้วทรงกระบอก

ในปี 2003 เช่นเดียวกัน A. I. Shutovและคณะ [3] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งเป็นคุณสมบัติของแก้วแผ่นราบที่ส่งผลต่อความเค้นทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาในที่นี้คือ อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ความหนาของแผ่นแก้ว และเวลาที่ใช้ในการทำให้แก้วเย็นตัว การหาค่าความเค้นภายในที่เหลือหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หาได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นที่พื้นผิว (σ_s) และความเค้นที่กึ่งกลางความหนาของแก้ว (σ_c) โดยมีสูตรดังนี้

$$X = |\sigma_s/\sigma_c|$$

ส่วนความแข็งแรงของแก้วหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_{st} = \sigma_0 + \sigma_c$$

โดย σ_0คือค่าความแข็งแรง ณ จุดเริ่มต้นการอบแก้ว ส่วน σ_cหาได้จากความแรงที่ได้จากการทำลายแก้วด้วยการตัด การกรีด หรือการเจาะผลจากการศึกษาในเรื่องนี้พบว่า ต้องเซทค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการอบไว้ที่ 650 °C ความหนาแผ่นแก้ว 3 มม. เวลาที่ใช้ในการทำให้แก้วเย็นตัว 3 วินาที จะทำให้ได้ค่า σ_cและ σ_0ประมาณ 95 – 99 % จากค่าที่ได้ตั้งไว้สำหรับการปฏิบัติงาน และค่า X จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.0 – 2.2 ซึ่งเป็นค่าที่เซทไว้ในการทำงานจริงเช่นกัน นอกจากนี้ยังทราบว่าถ้าใช้เวลาในการทำแก้วเย็นตัวลงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ คือ 3 – 10 วินาทีจะช่วยในเรื่องการประหยัดพลังงานได้อีกด้วย

ในปี 2008 M. Darif and N. Semmar [4] ได้ศึกษาแบบจำลองกระบวนการควบคุมการเย็นตัว Nanosecond Laser ของซิลิกอน (Si)โดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysicsเพื่อเป็นประโยชน์ในการควบคุมความหนาของวัสดุที่ละลายโดยใช้กรรมวิธีความร้อนเลเซอร์ ซึ่งรายงานนี้อ้างอิงการใช้สมการการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการกระบวนการดังนี้

$$\rho c_p \sigma T - (k\nabla T) = G_t \frac{\partial T}{\partial t}$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ c_pคือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะT คืออุณหภูมิ t คือเวลา k คือค่าการนำความร้อนและ G_t คือแหล่งความร้อนที่กระจายตามความลึกจากพื้นผิว(Y)ตามกฎของ Beer lambert โดยมีสูตรดังนี้

$$G_t(y,t) = I(t)(1-(R(T)))e^{((-\frac{y}{\delta a})/\delta_a)}$$

โดยที่ I (t) (W/cm^2) ค่าพลังงานจากเลเซอร์ คือ ตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณนี้เป็นรูปสี่เหลี่ยมแบบ 2D พื้นที่ที่ได้รับการฉายแสงจากเลเซอร์จะเป็นแหล่งความร้อนที่ถูกดูดกลืนพลังงานโดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ดังนี้

$$n(k\nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) + \sigma\varepsilon(T_{amb}^4 - T^4)$$

$$\text{และ } n(k\nabla T) = 0$$

n คือ เวคเตอร์ q_o คือ ความร้อนฟลักซ์ที่พื้นผิว h คือ สปส การถ่ายเทความร้อนโดยการพา T_{inf} คืออุณหภูมิด้านนอก σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ε คือ ค่าการดูดกลืนแสงและ T_{amb}คืออุณหภูมิแวดล้อม ในที่นี้ได้ทำการเปรียบเทียบความทนต่อการละลายและความหนาที่ละลายด้วยเลเซอร์ของการทำเป็นรูปโค้งและรูปประตู ที่ค่างานจากเลเซอร์เท่ากันรูปโค้งสามารถทนการละลายได้ดีกว่ารูปประตู และรูปโค้งจะทนงานจากเลเซอร์ได้สูงกว่าแบบประตู ซึ่งสูงถึง 1100 mJ/cm^{2}ความหนาจึงจะเริ่มละลาย

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นและประเภทของแก้ว

" แก้ว " เป็นวัตถุแข็งที่มีรูปลักษณะอยู่ตัวและเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นวัสดุที่เกิดจากการนำสารอนินทรีย์ต่างๆมาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่เกิดการตกผลึก หรือเป็นวัสดุอสันฐาน (Amorphous Material) ของซิลิเกตและออกไซด์อื่น ๆ เช่น CaO $Na_2OAl_2O_3$เป็นต้น แก้วมีความเป็นแวววาวและมีความเปราะในตัวเอง นอกจากนี้แก้วยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์ที่ทำให้แก้วถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น โปร่งใส ผิวค่อนข้างแข็ง ยากแก่การกัดกร่อน มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ และสามารถนำแก้วมาหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้โดยไม่นำกัดจำนวนครั้ง ซึ่งคุณสมบัติของแก้วที่ได้ยังคงเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง การแบ่งประเภทของแก้วสามารถแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิตแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งานซึ่งโดยทั่วไปมักแบ่งประเภทแก้วตามองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

1. แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass) เป็นแก้วที่ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย โซดาแอช หินปูน ซึ่งเป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไปได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้นสามารถทำให้เกิดสีต่างๆได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป

2. แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) หรือ Pyrex เป็นแก้วที่มีการเติมบอริคออกไซด์ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟเป็นต้น

3. แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์ อยู่มากกว่า 24% โดยน้ำหนักจะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงามและแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆได้ใช้ทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพงเช่นแก้วไวน์เป็นต้น

4. แก้วโอ-ปอล (Opal glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ทำให้มีการตกผลึก หรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้วทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่นหรือโปร่งแสงเนื่องจากสามารถหลอมและขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเมื่อนำนำไปผ่าน ขบวนการอบ (tempering) หรือการเคลือบ (laminating)

5. แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass) มีอลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลักมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (softening point) สูงพอที่จะ

ป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

6. แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (alkaline-earth alumino silicate) มีส่วนผสมของแคมเซียมออกไซด์หรือแบเรียมออกไซด์ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่วแต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

7. กลาส-เซรามิกส์ (glass-ceramics) เป็นแก้วประเภทลิเธียมอลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2หรือ ZrO_2ผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้วซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใสขึ้นกับชนิดของผลึกกลาส-เซรามิกส์จะทนทานและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้มหรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้นอกจากนี้ อาจมีแก้วประเภทอื่น ๆ อีกหลายประเภทขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป แต่เนื่องจากอาจไม่มีการใช้ที่แพร่หลายนักจึงไม่นำมากล่าวในที่นี้

จากประเภทของแก้วทั้ง 7 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้น จะสังเกตได้ว่า แก้วโซดาไลม์ เป็นแก้วที่มีความเกี่ยวข้องและพบเห็นได้บ่อยในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยในที่นี้จะเน้นเฉพาะแก้วที่เป็นขวดหรือบรรจุภัณฑ์ซึ่งถือเป็นแก้วที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในปัจจุบันเป็นอย่างมาก

3.2 เทคโนโลยีกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว

การผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว หรือขวดแก้วนั้นมีขั้นตอนการผลิตที่สำคัญหลายขั้นตอน ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์และวัตถุดิบต่าง ๆ จนถึงการบรรจุหีบห่อและการจัดเก็บเข้าคลังสินค้า โดยมีขั้นตอนในการผลิตหลัก ๆ ดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ(Raw Materials)
2. การผสมวัตถุดิบ (Mixing)
3. การหลอมแก้ว (Melting)
4. การขึ้นรูปแก้ว (Forming)
5. การอบอ่อน Annealing)
6. การเคลือบผิวขวด (Cold end Coating)
7. การทดสอบและการตรวจสอบคุณภาพ (Testing and Inspection)

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Materials)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. วัตถุดิบหลัก (Main materials)คือ วัตถุดิบที่มีความสำคัญและใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณค่อนข้างมากเพราเป็นส่วนผสมที่ทำให้เกิดเนื้อแก้ว ซึ่งมีวัตถุดิบดังต่อไปนี้

1.1 ซิลิกาแซนด์ (Silica sand : SiO_2)เป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงมีความแข็งแกร่ง ทนต่อสารเคมีและเป็นวัตถุดิบหลักสำคัญที่ช่วยในการสร้างเนื้อแก้ว

1.2 โดโลไมท์ (Dolomite : $MgCO_3 \bullet CaCO_3$) ที่มีคุณสมบัติช่วยในการเซตของน้ำแก้วเมื่อน้ำแก้วเย็นตัวลงทำให้ทำการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีด้วย

1.3 เฟลด์สปาร์ (Feldspar :$Na_2O \bullet Al_2O_3 \bullet 6Si_2O$) มีออกไซด์ที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีและทนการสึกกร่อนได้ดี

1.4 ไลม์สโตน (Limestone : $CaCO_3$) มีออกไซด์ของธาตุเดียวกับบางธาตุในโดโลไมด์เพราะฉนั้นจึงมีคุณสมบัติคล้ายกันคือ ช่วยในเรื่องการเซตตัวและเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี

1.5 โซดาแอช (Soda ash : Na_2CO_3) มีคุณสมบัติเป็น Flux คือ ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมของแก้ว ให้ต่ำลงจึงใช้พลังงานน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยให้เนื้อแก้วอ่อนนิ่ม ซึ่งจะช่วยในการขึ้นรูปง่ายขึ้น แต่ถ้ามีสารนี้ในปริมาณมากไปจะทำให้แก้วหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำจึงทำให้แก้วเปราะและแตกง่ายได้ง่าย

1.6 เศษแก้ว (Cullet)เป็นการนำแก้วที่ใช้แล้วมาหลอมใหม่ซึ่งนำจากจะช่วยในการเรื่องการรักษาสิ่งแวดล้อมแล้ว เศษแก้วยังมีคุณสมบัติสำคัญอื่น ๆ อีกคือช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้วให้ต่ำลง และการนำเศษแก้วมาใช้เป็นส่วนผสมในทุก ๆ ปริมาณ 10 % ของส่วนผสมทั้งหมดยังช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ 3 %

2. วัตถุดิบรอง (Premix) คือ วัตถุดิบที่มีส่วยช่วยเสริมหรือเพิ่มคุณสมบัติบางประการของขวดแก้ว โดยจะใช้สารต่อไปนี้ในปริมาณเล็กน้อยในการผสม

2.1 โค๊ก (Coke : C) : เป็นสารที่ทำให้เกิดการรีดิวซ์ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการให้ออกซิเจนซึ่งทำให้เนื้อแก้วมีสีชา

2.2 ซอลเค๊ก (Salt cake : Na_2SO_4) เป็นสารที่ช่วยป้องกันการเกิดเป็นฝ้า (ซิลิก้า สกัม) ซึ่งจะลอยอยู่ในเนื้อแก้วที่กำลังหลอมทำให้การหลอมไม่สมบูรณ์

2.3 ไอรอนออกไซด์ (Iron Oxide : Fe_2O_3และ FeO)เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชั่นซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการรับออกซิเจนมีผลทำให้แก้วขาวใส แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลทำให้น้ำแก้วมีสีเขียวได้

2.4 ซีลีเนียม (Selenium : Se) เป็นธาตุทำช่วยในการฟอกสีแก้วช่วยไล่สีชมพูออกโดยการระเหย จึงทำให้น้ำแก้วมีสีขาวใส

2.5 โครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide : Cr_2O_3) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มสีให้กับเนื้อแก้ว โครเมียมออกไซด์จะช่วยทำให้เนื้อแก้วเป็นสีเขียว หรือถ้าต้องการเปลี่ยนสีแก้วเป็นสีฟ้าทำได้โดยการผสม Cobalt Oxide (CoO), สีเหลืองจาก Urenium (U), สีน้ำตาลจาก Nickle (Ni), สีอำพันจาก Carbon-Sulfur-Iron (C-S-Fe), และสีชมพูจาก Manganese (Mn) เป็นต้น

การตรวจสอบวัตถุดิบ ในการรับวัตถุดิบมาแต่ละครั้งจะมีการสุ่มตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารทุกชนิดว่ามีองค์ประกอบอยู่ในค่าควบคุมหรือไม่ โดยจะนำสารต่างมาตรวจสอบด้วยเครื่อง X – Ray Spectrometer ตรวจสอบ Grain sizeความชื้นและสิ่งเจือปนของสารแต่ละชนิดด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการผสมและช่วยควบคุมน้ำแก้วให้เป็นไปตามสูตรที่คำนวณไว้ง่ายขึ้น

3.2.2 การผสมวัตถุดิบ (Mixing) หลักการตรวจสอบวัตถุดิบแล้วขั้นตอนต่อมาเป็นการผสมวัตถุดิบ เพื่อเป็นการเตรียมสารก่อนนำเข้าสู่เตาหลอมซึ่งการผสมดังกล่าวจะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนการผสมดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักส่วนผสมแต่ละชนิดให้ได้ตามที่คำนวณไว้เพื่อให้ได้น้ำแก้วที่มีองค์ประกอบตามสูตรที่คำนวณไว้
2. นำส่วนผสมในข้อ 1 มาใส่ในเครื่องผสมเพื่อกวนให้วัตถุดิบต่าง ๆ กระจายตัวได้ดีขึ้น
3. นำวัตถุดิบที่กวนเข้ากันได้ดีแล้วออกจากถังกวน เพื่อนำไปสู่สายพานป้อนเข้าไซโลข้างเตาหลอม โดยในระหว่างการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบด้วยสายพานจะมีการปนเศษแก้วที่เตรียมไว้เป็นระยะ ๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการชำรุดหรือการสึกหรอที่อาจเกิดจากเศษแก้ว
4. วัตถุดิบที่ผสมแล้วในข้อ 3 จะถูกป้อนเข้าไซโลข้างเตาหลอมเพื่อเตรียมพร้อมป้อนเข้าสู่เตาหลอม โดยเครื่องควบคุมจะหยุดผสมวัตถุดิบเมื่อปริมาณวัตถุดิบในไซโลอยู่ในระดับที่กำหนดไว้และถ้าปริมาณวัตถุดิบลดลงมากกว่าระดับที่กำหนดไว้เครื่องควบคุมจะทำการผสมโดยอัตโนมัติ

3.2.3 การหลอมแก้ว (Melting) เตาหลอมแก้วจะถูกสร้างด้วยอิฐทนไฟจำนวนมากประกอบกันจนได้ห้องหลอมที่มีปริมาตรตามที่กำหนดไว้ หลังจากการสร้างเตาเสร็จสมบูรณ์เตาจะมีหน้าที่ในการหลอมตลอดเวลาเป็นระยะเวลาต่อเนื่องกันอย่างน้อย 10 ปี จึงจะหยุดทำหน้าที่ ส่วนอายุเตาที่ใช้ในการหลอมจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมระหว่างการใช้งาน ซึ่งหน้าที่และหลักการทำงานของเตาหลอมแก้วมีดังนี้

เตาหลอมที่ใช้เป็นระบบ Regenerative End Fire Furnace (SORG REFINER) โดยมีห้องอุ่นลมสองข้าง (Regenerator) ซึ่ง Burner จะสลับกันทำงาน ถ้า Burner ข้างขวาทำงานลม Combustion

ที่ช่วยในการเผาไหม้จะถูกดูดผ่านห้องอุ่นลมทางด้านขวาและรับการถ่ายเทความร้อนจากอิฐรังผึ้ง (Checker) ทำให้ลมมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งช่วยในการเผาไหม้ในบริเวณห้องหลอม ในขณะเดียวกัน Waste Gas ที่เกิดจากการเผาไหม้ดูดออกปล่องทางห้องอุ่นลมด้านซ้าย อิฐรังผึ้ง (Checker)จะทำหน้าที่เก็บความร้อนที่ถูกปล่อยออกมากับลมร้อน Burner และห้องอุ่นลมจะทำงานสลับข้างกันแบบนี้ตลอดการทำงานของเตา สำหรับเชื้อเพลิงของสำหรับ Burner ที่ใช้ในการเผาไหม้จะมีทั้งน้ำมันเตาหรือก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)ทั้งนี้ขึ้นอยู่ความสะดวกและความเหมาะสมของสถานที่ตั้งของโรงงาน นอกจากพลังงานเชื้อเพลิงแล้วการหลอมแก้วยังใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยในการหลอมเหลวและรักษาอุณหภูมิของน้ำแก้วภายในเตาหลอมอีกด้วย ภายในเตาหลอมจะประกอบด้วยวัตถุดิบที่ยังไม่หลอมละลายซึ่งจะลอยตัวอยู่ด้านบน ส่วนวัตถุดิบที่ละลายแล้วจะจมอยู่ด้านล่างและน้ำแก้วที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะผ่านเข้าไปยังบริเวณ Deep zone เตรียมผ่านไปยังคอเตา (Throat) แล้วรอดไปยังห้องแก้วใส (Working end)น้ำแก้วบริเวณนี้เป็นน้ำแก้วที่สมบูรณ์พร้อมสำหรับการขึ้นรูป หลังจากนั้นน้ำแก้วจะถูกปล่อยไปยัง Forehearth ซึ่งเป็นรางน้ำแก้วที่จะนำน้ำแก้วไปยังเครื่องขึ้นรูปต่อไป

3.2.4 การขึ้นรูปแก้ว (Forming) การขึ้นรูปแก้วเป็นกระบวนการนำน้ำแก้วที่ถูกหลอมเหลวสมบูรณ์มาทำให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการโดยการใช้โมล์ดเป็นบล็อกที่ทำให้เกิดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งจะมีการปรับอุณหภูมิและลม Cooling ต่าง ๆ ให้เหมาะตามน้ำหนักแก้วและประเภทของการขึ้นรูป ชิ้นส่วนโมล์ดจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ หลายชิ้นโดยทุกชิ้นจะเป็นอิสระต่อกัน ถ้าพบว่าโมล์ดชิ้นส่วนใดบกพร่อง ไม่สมบูรณ์ในระหว่างการขึ้นรูปสามารถปรับเปลี่ยนเฉพาะชิ้นส่วนนั้น ๆ ได้ทันที

กระบวนการขึ้นรูปขวดแก้วแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. การขึ้นรูปแบบเป่า-เป่า (Blow & Blow) เป็นการขึ้นรูปขวดแก้วโดยการเป่า
2. ลมเข้าไปในน้ำแก้วทั้งในช่วงการขึ้นรูปพาริสัน (Parison) และการขึ้นรูปให้ได้ตามแบบที่ออกแบบไว้ ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะใช้สำหรับขึ้นรูปขวดปากแคบทั่ว ๆ ไป เช่น ขวดน้ำอัดลม เบียร์ เครื่องดื่มชูกำลัง และขวดซอส น้ำปลาต่าง ๆ เป็นต้น
3. การขึ้นรูปแบบกด-เป่า (Press & Blow)เป็นการขึ้นรูปขวดแก้วโดยการใช้เครื่องมือกดลงไปในน้ำแก้วเพื่อเป็นการนำร่องในการขึ้นรูปในช่วงการทำพาริสัน (Parison)เมื่อได้ Preformed หรือพาริสันแล้วน้ำแก้วนะถูกเปลี่ยนไปยังโมล์ดอีกด้านหนึ่ง เพื่อขึ้นรูปให้ได้ตามแบบที่ต้องการโดยการเป่าด้วยลมอีกครั้ง วิธีการขึ้นรูปแบบนี้จะช่วยให้ความหนา-บางของผนังขวดแก้วสม่ำเสมอกันมาขึ้น และเหมาะสำหรับขึ้นรูปขวดปากกว้างซึ่งส่วนมากเป็นขวดที่น้ำไปบรรจุผัก ผลไม้ แยม และอาหารหมักดองต่าง ๆ เป็นต้น

4. การขึ้นรูปแบบกด-เป่า สำหรับขวดปากแคบ เป็นเทคโนโลยีที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาในด้านน้ำหนักของขวดแก้วในการขนส่ง จากขวดแก้วที่มีน้ำหนักมากให้มีน้ำหนักน้อยลง โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ และความแข็งแรงยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน วิธีนี้นอกจากจะช่วยทำให้ขวดแก้วมีน้ำหนักเบาลงกว่าเดิมในขวดที่มีปริมาตรเท่ากันแล้วยังช่วยทำให้ได้แก้วที่มีความหนา-บางน้อยลงและผนังมีความหนามีสม่ำเสมอมากขึ้น การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้มักใช้กับโมล์ดเฉพาะเท่านั้นเนื่องจากราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูงกว่า 2 แบบแรก ตัวอย่างขวดที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น ขวดไวตามิลทูโก และขวดน้ำส้ม Splash เป็นต้น

ขั้นตอนการขึ้นรูปและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป

โดยทั่วไปขั้นตอนการขึ้นรูปจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่คือ การขึ้นรูปพาริสัน (Parison)ในส่วนของ Blank Mould และการขึ้นรูปให้ได้ตามแบบที่ต้องการ ในส่วนของ Blow Mould ซึ่งอุปกรณ์และหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. การขึ้นรูปพาริสัน (Parison)ในส่วน Blank Mould

1.1 Blank Mould เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron มีหน้าที่ขึ้นรูปแท่งแก้วให้ทรงคล้ายหลอดทดลองที่นิยมใช้ในห้องแล็บทั่ว ๆ ไป

1.2 Baffle เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Nickel base Alloy มีหน้าที่ขึ้นรูปก้นขวดและเป็นช่องผ่านของลมที่ใช้ในการ Settle Blow

1.3 Funnel เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron มีหน้าที่รับ Gob ลงสู่ Blank Mould และยังเป็นช่องทางผ่านของลมที่ใช้ในการ Settle Blow อีกด้วย

1.4 Guide Ring เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Nickel base Alloy มีหน้าที่ขึ้นรูปขอบปากขวดด้านบนผิวปากขวด (Sealing Surface)

1.5 Neck Ring เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Silicon Bronze มีหน้าที่ขึ้นรูปปากขวดและช่วงคอขวด

1.6 Thimble เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Tool Steel มีหน้าที่กำหนดระยะของขอบปากขวดด้านใน และควบคุมทิศทางขึ้นลงของ Plunger

1.7 Plunger เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Nickel base Alloy มีหน้าที่เป็นทางผ่านของลม Counter Blow และเป็นตัวกำหนดขนาดปากขวดด้านใน

1.8 Internal Cooling เป็นวัสดุที่ทำจาก Steel มีหน้าที่เป็นทางผ่านของลมที่ช่วยระบายความร้อนไปยัง Plunger

2. การขึ้นรูปขวดสำเร็จรูปในส่วน Blow Mould

2.1 Blow Mould เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Silicon Bronze มีหน้าที่ในการขึ้นรูปขวดจากพาริสันให้เป็นขวดสำเร็จรูปตามแบบ

2.2 Bottom Plate เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron และ Silicon Bronze มีหน้าที่ในการขึ้นรูปก้นขวดและเป็นทางผ่านของลม Vacuum

2.3 Blow Head เป็นวัสดุที่ทำจาก Cast Iron มีหน้าที่เป็นช่องส่งผ่านของลม Final Blow ซึ่งเป็นลมที่ช่วยให้ขวดมีรูปร่างสมบูรณ์ตามแบบ

2.4 Take out tong เป็นวัสดุที่ทำจาก Glass Mate และ Silicon Bronze มีหน้าทีนำขวดที่ขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์แล้วออกจาก Blow Mould สู่ Dead Plate เพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป

3.2.5 การอบอ่อน (Annealing) เป็นหนึ่งในหลายวิธีของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิจากร้อนไปเย็น เพื่อลดปัญหาและความเสียหายของวัสดุที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง โดยก่อนจะนำขวดหลังการขึ้นรูปเข้าสู่กระบวนการอบอ่อนจะมีการเคลือบด้วยสารเคมีคือ Satanic Chloride ($SnCl_4$) โดยสารนี้จะไปสัมผัสกับผิวของขวดในขณะที่ขวดยังร้อนอยู่ ซึ่งโมเลกุลของ Satanic Chloride ($SnCl_4$) จะแทรกตามผิวขวดที่หยาบ เพื่อลดรอยแตกขนาดเล็ก ๆ ในพื้นผิว (Micro Crack) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับขวดแก้ว โดยลักษณะการเคลือบสารดังกล่าวจะใช้วิธีการพ่นในบริเวณลำตัวหรือช่วง Contact ของขวด ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนของแก้วจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. ช่วงการให้ความร้อน (Heating) อุณหภูมิของขวดก่อนเข้าเตาอบจะแตกต่างกันไปตามหลักการการเซตอุณหภูมิจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักและปริมาตรของขวดแบบต่าง ๆ ในช่วงแรกของการนำขวดเข้าสู่เตาอบจะต้องทำการให้ความร้อนแก้ขวดก่อน เพื่อจะทำให้ขวดมีอุณหภูมิเข้าสู่กว่าช่วง Annealing Point (490 - 550 °C) แล้วจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงให้ผ่าน Annealing Point อย่างต่อเนื่อง เวลาที่ใช้ในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนขวดที่เข้าสู่เตาอบซึ่งโดยปกติใช้เวลาประมาณ 20 นาที

2. ช่วงการปล่อยให้ความร้อนในเตากระจายตัวให้ทั่ว (Soaking)ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่สำคัญมากขั้นหนึ่งต่อการกระบวนการอบ เนื่องจากจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงควบคุมของ Annealing Point (490 - 590°C) เป็นเวลา 15 – 20 นาที โดยจะใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)เป็นตัวพาความร้อนและอาจใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยควบคุมอุณหภูมิ การอบในช่วงนี้หากใช้อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้ต้องใช้เวลามากในการอบ แต่ถ้าน้อยเกินไปอาจส่งผลให้ความเครียดที่เกิดจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงถูกจำกัดอย่างไม่สมบูรณ์อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของเนื้อแก้วได้

3. ช่วงการทำให้เย็นตัวลง (Cooling)เป็นช่วงสำคัญที่ต่อเนื่องจากช่วง Soaking เนื่องจากต้องทำให้แก้วเกิดการเย็นตัวลงอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราความเร็วที่เหมาะสมก่อนจะแก้วจะสัมผัสกับบรรยากาศภายนอกเตาอบ ซึ่งต้องทำให้แก้วเกิดความแข็งแรงมากพอที่จะรองรับการเกิดความเค้นในระยะยาวได้โดยไม่เกิดการแตกหักที่เป็นผลจากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง

3.2.6 การเคลือบผิวขวด (Cold end Coating)การเคลือบผิวขวดจะทำหลังจากขวดออกจากเตาอบแล้ว โดยสารที่ใช้เคลือบเป็นโพลิเอทธิลีน (Polyethylene)ชนิดที่เป็น Food Grade ซึ่งจะใช้วิธีการพ่นในบริเวณช่วงลำตัวและจุดสัมผัส (Contact Point)เพื่อเพิ่มความลื่นและลดรอยเสียดให้กับผิวขวด

3.2.7 การทดสอบและการตรวจสอบคุณภาพ (Testing and Inspection) กระบวนการทดสอบและตรวจสอบในขั้นนี้จะเป็นการนำขวดที่ผ่านกระบวนการข้างต้นทั้งหมดแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจเกิดจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Testing) มีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) เป็นการทดสอบสำหรับขวดที่ถูกนำไปผ่านกระบวนการบรรจุร้อนในกระบวนการผลิตถัดไป โดยการทดสอบจะนำขวดไปแช่ในน้ำร้อนเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำขวดไปแช่ในน้ำเย็นทันทีเป็นเวลา 3 นาที ซึ่งอุณหภูมิของน้ำร้อนและเย็นจะต้องแตกต่างกันไม่เกิน 42 – 53 °C ในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

1.2 ความทนทานต่อการทนต่อแรงกดในแนวดิ่ง (Vertical Load Resistance)เป็นการทดสอบโดยจะค่อย ๆ เพิ่มแรงกดลงบนขวดซึ่งในที่นี้จะตั้งแรงกดในการทดสอบให้สามารถรับแรงกดในแนวดิ่งได้ 545 - 2100 kgทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการประหยัดพื้นที่ในการเก็บขวด

1.3 ความทนทานต่อแรงกระทบ (Impact Resistance) การทดสอบแรงกระทบนี้จะทดสอบ ณ จุดสัมผัส (Contact Point)ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการทนแรงกระทบในกระบวนการผลิตและการขนส่ง โดยในการทดสอบนี้จะตั้งค่าความเร็วในทดสอบเป็น 40 ips

1.4 ความทนทานแรงดันภายในขวด (Internal Pressure Resistance)เป็นการทดสอบการทนแรงดันที่อาจเกิดจากการบรรจุ CO_2หรือการบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ลงไปภายในขวด โดยจะกำหนดค่าต่ำสุดของขวดในการรับแรงดันที่บรรจุเป็น 14 kg/cm^2

1.5 การทดสอบปริมาณสารที่พ่นหรือเคลือบลงบนผิวขวด ทั้งนี้จะแบ่งการทดสอบเป็นปริมาณ Hot and Cold End Coating ในส่วนที่ไม่ต้องการให้พบสารดังกล่าวคือ บริเวณปากขวดและบริเวณลำตัวเพื่อตรวจสอบว่าปริมาณสารอยู่ในค่าควบคุมหรือไม่

1.6 การตรวจสอบความเครียดของขวด จะทำโดยการขวดไปส่องผ่านโพลาริสโคปที่มีทินท์เพลท (Polariscope With Tin Plate) แล้วตรวจสอบลักษณะสีที่สังเกตเห็น ณ องศาที่กำหนด ซึ่งสีดังกล่าวจะช่วยบอกความเครียดเบื้องต้นได้ จากนั้นวัดความหนาก้นขวดและนำค่าความหนาก้นขวดกับองศามาเทียบเบอร์ความเครียดตามตารางความเครียด เพื่อตรวจสอบระดังความเครียดของขวดแก้ว

2. การตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยจะแบ่งการตรวจสอบดังกล่าวออกเป็น 2 ประเภท คือ การตรวจสอบโดยพนักงานและเครื่องตรวจสอบซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การตรวจสอบโดยพนักงาน มีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้

2.1.1 การตรวจสอบด้วยเกจ (Go No Go Gage)ในขั้นตอนนี้พนักงานจะทำการตรวจสอบขวดทุกโมล์ดด้วยความถี่ทุก 1 ชั่วโมง เพื่อเป็นการตรวจสอบขนาดต่าง ๆ ขวดว่าอยู่ในค่าควบคุมหรือไม่

2.1.2 การตรวจสอบข้อบกพร่องด้วยสายตา เป็นการตรวจสอบก่อนเข้าเครื่องตรวจสอบเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องที่สังเกตเห็นได้ง่ายด้วยตาเปล่า ซึ่งจะช่วยให้เมื่อทราบข้อบกพร่องแล้วพนักงานสามารถเลือกข้อบกพร่องนั้น ๆ ของโมล์ดนั้น ๆ ที่หน้ารางได้ก่อนทีขวดจะเข้าสายพานและเป็นการทวนสอบเครื่องตรวจสอบได้ทางหนึ่งหากมีข้อบกพร่องประเภทนั้น ๆ หลุดไป นอกจากนี้ยังสามารถแจ้งระวังข้อบกพร่องไปยังพนักงานสุ่มตรวจสอบได้

2.1.3 การสุ่มตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องตรวจสอบ พนักงานจะนำขวดตัวอย่างของข้อบกพร่องต่าง ๆ มาผ่านเครื่องตรวจสอบแล้วบันทึกผล หากพบว่าเครื่องทำงานผิดปกติให้แจ้งช่างเครื่องเพื่อทำการตรวจสอบและแก้ไขต่อไป

2.1.4 การสุ่มตรวจสอบท้ายราง พนักงานจะทำการสุ่มตรวจสอบท้ายรางโดยคำนวณจำนวนที่ต้องสุ่มจากความเร็วในการผลิตโดยอ้างอิงตาม AQL ที่กำหนดเป็นมาตรฐาน หากว่าข้อบกพร่องเกิน AQL จะต้องทำการ Hold ขวดในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อตรวจสอบอีกครั้งและแจ้งระวังปัญหาไปยังหน้ารางและฝ่ายผลิต

2.2 การตรวจสอบโดยใช้เครื่องตรวจสอบ มีรายการเครื่องตรวจสอบที่ติดตั้งไว้ในไลน์ผลิตดังนี้

2.2.1 MCAL 3 เป็นเครื่องตรวจสอบที่ใช้การจัดภาพด้วยกล่องซึ่งจะสามารถตรวจสอบข้อบกพร่องเกี่ยวกับสิ่งแปลกปลอมในเนื้อแก้วทั้งบริเวณผนังด้านข้างลำตัวละก้นขวด

2.2.2 OLT เป็นเครื่องตรวจสอบความหนา-บาง ของผนังขวดบริเวณลำตัวโดยใช้หลักส่องผ่านของแสง ซึ่งจะทำการตั้งค่าความเข้มของแสงไว้ค่าหนึ่งถ้าหากเซนเซอร์อีกด้านหนึ่งของช่องทางที่ขวดผ่านตรวจจับสัญญาณได้ เครื่องตรวจสอบจะทำการปัดขวดออกไปยังช่องทิ้งขวด

2.2.3 Metal Detector เป็นเครื่องตรวจจับโลหะที่อาจปนมากับส่วนผสมโดยใช้หลักการนำแม่เหล็กมาประยุกต์ในใช้ในการตรวจสอบ

2.2.4 M 1 เป็นเครื่องที่มีหน้าที่ในการตรวจสอบเกี่ยวกับปัญหาดังต่อไปนี้

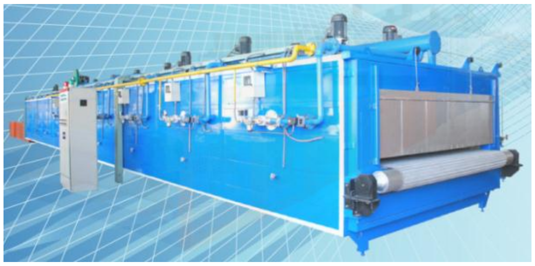
- คอตีบ (Chocked neck)คือลักษณะที่มีน้ำแก้วไปอุดตันบริเวณปากขวดด้านในซึ่งส่งผลกระทบต่อการนำขวดไปใช้งานต่อ เพราะอาจทำให้หัวบรรจุเกิดความเสียหายได้ การตรวจสอบจะติดตั้งแท่งวัสดุให้ทะลุเข้าไปในปากขวดโดยปกติความยาวของวัสดุที่ใช้จะยาวประมาณคอขวด

- ปากไม่เต็ม (Unfilled Finish)การตรวจสอบดังกล่าวจะใช้การเป่าลมลงไปในขวดให้เต็มแล้วเครื่องจะทำการตรวจสอบว่ามีลมรั่วออกมาด้านนอกขวดหรือไม่

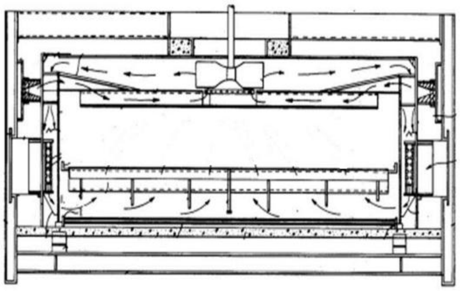
- รอยร้าวบริเวณปากขวด (Checked Finish)การตรวจสอบนี้จะใช้หลักการสะท้อนของแสง เนื่องจากรอยร้าวจะมีลักษณะการสะท้อนของแสงมากกว่าขวดปกติ หากเซนเซอร์ตรวจจับพบการสะท้อนดังกล่าวเครื่องจะทำการปัดขวดทิ้งยังช่องทิ้งขวด

3.3 เตาอบอ่อน

3.3.1 ส่วนประกอบของเตาอบอ่อน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของเตาอบอ่อน [9]

ก) ลักษณะภายนอกของเตาอบอ่อน

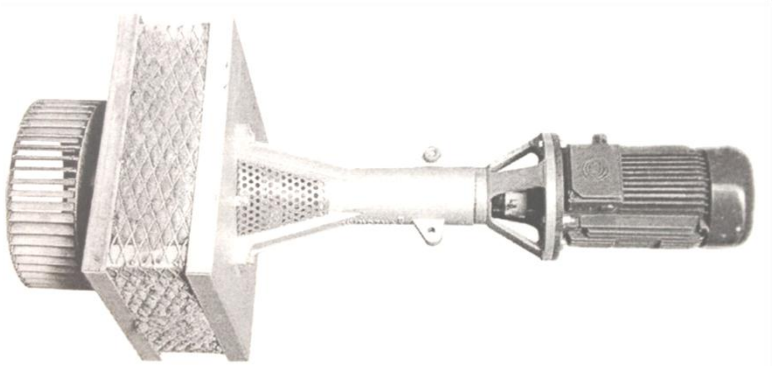
ข) ลักษณะภายในของเตาอบอ่อน

ส่วนประกอบของเตาอบอ่อนมีดังนี้

1. Input-output part เป็นอุปกรณ์ปิด-เปิดทางเข้า-ออกของเตาอบซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้ามาภายในและช่วยลดการสูญเสียความร้อนภายในเตา

2. Inner-cover ทำหน้าที่บรรจุบรรจุภัณฑ์แก้ว

3. Power-fan เป็นพัดลมที่ถูกติดตั้งไว้ด้านบนของเตาอบทำหน้าที่ช่วยในก๊าซLPG ภายในเตาเกิดการหมุนเวียนกระจายตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 3.2 ลักษณะของพัดลม [9]

4. Controlled temperature มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ โดยอุปกรณ์ในส่วนนี้ประกอบด้วย heat means, cooling means, thermo-couples และ digital temperature controllers

5. Furnace (outer-cover) เตาเผาทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้จะเกิดการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับแก๊ส LPG เมื่อเกิดการเผาไหม้จึงเกิดความร้อนที่ถูกถ่ายเทเข้าไปภายในเตาอบ

3.3.2 หลักการทำงานของเตาอบอ่อน

ในกระบวนการอบอ่อนแก้วจะนำบรรจุภัณฑ์แก้วจำนวนมากไว้ในเตาอบทั้งนี้ขึ้นรูปกับขนาดและความเร็วของเครื่องขึ้นรูปในการผลิต ซึ่งผนังภายในเตาอบอ่อนจะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและป้องกันอากาศเข้ามาแทนที่แก๊ส LPG หลังจากนั้นทำให้เกิดการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อนระหว่างผนังด้านในและด้านนอกโดยใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ภายในเตาจะมีพัดลมติดไว้ด้านบนเพื่อช่วยในแก๊ส LPG เกิดการหมุนเวียนและกระจายตัวได้ดี เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วอุณหภูมิภายในเตาจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะเกิดการส่งผ่านความร้อนมายังบรรจุภัณฑ์แก้วด้วยวิธีการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของแก๊ส LPG ความร้อนจะถูกส่งผ่านมาอย่างรวดเร็วทุกพื้นที่ของเตาอบ ในขณะเดียวกันสายพานซึ่งเป็นวัสดุรองรับขวดภายในเตาอบมีการส่งผ่านความร้อนไปยังบรรจุภัณฑ์แก้วด้วยการแผ่รังสีการนำและการพาความร้อน ในระหว่างกระบวนการจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งที่ทตำแหน่งพื้นผิวภายนอกจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวภายในและตำแหน่งที่เป็นพื้นผิวโค้งงอจะมีอุณหภูมิสูงกว่าต่ำแหน่งที่เป็นพื้นผิวเรียบเมื่อเทียบอุณหภูมิในเวลาเดียวกัน จากความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วซึ่งต่ำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดความเค้นสูงกว่าต่ำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ หลังจากได้อุณหภูมิบรรจุภัณฑ์แก้วจากการอบตามต้องการแล้วบรรจุภัณฑ์แก้วจะถูกนำออกสู่บรรยากาศภายนอกและจะมี cooling fan จำนวนมากมาช่วยลดอุณหภูมิให้บรรจุภัณฑ์แก้วมีอุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วเพื่อนำสู่กระบวนการตรวจสอบต่อไป

3.4 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

กรรมวิธีทางความร้อน คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโดยการนำวัสดุที่เป็นของแข็งมาให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงในอัตราความเร็วที่แตกต่างกัน เพื่อทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลตามต้องการ ซึ่งกรรมวิธีทางความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังต่อไปนี้

1. การอบอ่อน (Annealing)
2. การอบปกติ (Normalizing)

3. การชุบแข็ง (Hardening)
4. การอบคืนตัว (Tempering)

ประเภทของกรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ จะมีวัตถุประสงค์และอุณหภูมิที่ใช้ก็ต่างกันตามชนิดของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะทางความร้อนที่ใช้กับแก้ว คือ การอบอ่อน (Annealing)

การอบอ่อน (Annealing) มีความมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น การขึ้นรูปร้อน การขึ้นรูปเย็น การเชื่อม หรือการผ่านการหล่อ ซึ่งขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ จะก่อให้เกิดคุณสมบัติที่ไม่ดีกับวัสดุหลายประการ เช่น

วัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเนื้อจะมีคุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอกันในบริเวณที่เป็นส่วนมุมแหลม ซึ่งบริเวณนั้นจะมีอัตราการเย็นตัวสูงและมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ โครงสร้างบริเวณพื้นผิววัสดุจะประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กเพราะถูกแรงกระแทกหรืออัดมากกว่าผิวภายใน จึงทำให้วัสดุเกิดความไม่สม่ำเสมอกันวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นจะมีความเครียด (Strain) เหลืออยู่ในเนื้อวัสดุ เนื่องจากการถูกแรงอัดหรือบีบ จึงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอ สูญเสียความเหนียว (Ductility)

วัสดุที่ผ่านงานเชื่อม เป็นการทำให้ความร้อนแก่วัสดุเป็นบางจุด การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนและการหดตัวเมื่อถูกปล่อยให้เย็น ย่อมเป็นการยากที่จะทำให้การขยายและหดตัวเป็นไปได้อย่างทั่วถึง จึงมักทำให้เกิดความเครียดเหลือค้างอยู่ และโครงสร้างของวัสดุบริเวณที่ถูกเชื่อมจะต่างจากบริเวณอื่น ๆ ทั่วไป จึงเป็นสาเหตุให้คุณสมบัติของวัสดุขาดความสม่ำเสมอ

วัสดุที่ผ่านการหล่อ ยิ่งสามารถสังกตไม่ง่ายโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุจะมีส่วนแตกต่างกันมาก เพราะอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อจะแตกต่างกันทั้งในส่วนที่หนาและส่วนที่บาง ยิ่งบริเวณในส่วนที่เป็นมุมจะมีอัตราการเย็นตัวสูงและมีความแข็งแรงสูงด้วย

จากความคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอกันของวัสดุอาจส่งผลต่อการนำวัสดุไปใช้ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการปรับตั้งเครื่องมือและได้วัสดุที่มีคุณภาพไม่ดีไปใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทำการอบอ่อนก่อนนำวัสดุไปใช้งานซึ่งการอบอ่อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. การอบอ่อนแบบสมบูรณ์ (Full Annealing)มีวัตถุประสงค์เพื่อให้วัสดุมีความอ่อนตัวสูง
2. การอบอ่อนแบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Annealing)แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

- การอบอ่อนเพื่อขจัดความเครียดเหลือค้าง (Stress Relieve Annealing)
- การอบอ่อนเพื่อความอ่อนตัวสูง (Spheroidizingor Spheroidize Annealing)

สำหรับในกระบวนการผลิตขวดแก้ว จะทำการอบอ่อนเพื่อขจัดความเครียดเหลือค้าง (Strain Relieve Annealing) ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง หากปล่อยให้แก้เย็นตัวลงเองจะทำให้แก้เกิดการแตกได้ง่าย เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของแก้วภายในและภายนอกหรือตามมุมต่าง ๆ ไม่เท่ากันอันเป็นผลเนื่องจากความเค้น (Stress)ในรูปของความเค้นแรงดึง (tensile Stress)ที่ผิวแก้ว และความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)ภายในเนื้อแก้ว เมื่อเกิดความแตกต่างของความเค้นระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ จึงเป็นสาเหตุทำให้แก้วแตกได้ ดังนั้นจึงต้องขจัดความเครียดและป้องกันการเกิดความเค้นถาวร โดยการควบคุมอุณหภูมิแก้วให้อยู่ผ่านช่วงการอบอ่อน (Annealing Range)คือ ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำให้แก้วถูกขจัดความเครียดได้ ซึ่งช่วงดังกล่าวจะประกอบไปด้วย Strain Point เป็นจุดที่มีอุณหภูมิที่ช่วยขจัดความเครียดในเนื้อแก้วโดยจะใช้เวลาในช่วงนี้ประมาณ 1 ชั่วโม และอุณหภูมิที่สำคัญอีกจุดหนึ่งคือ Annealing Point เป็นจุดที่มีอุณหภูมิที่ช่วยขจัดความเครียดเช่นเดียวกันโดยจะใช้เวลาในช่วงนี้ประมาณ 15 นาที หลังจากนี้เมื่อได้ขวดแก้วที่ถูกขจัดความเครียดออกไปแล้วต้องทำการควมคุมอุณหภูมิในจุดต่าง ๆ ของแก้วให้ลดลงอย่างสม่ำเสมอกันทุกจุดเพื่อป้องกันการเกิดความเครียดเพิ่มขึ้นอีก

หลังจากแผ่นแก้วถูกขึ้นรูปที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงและต้องการทำให้แผ่นแก้วเย็นตัวลงทีอุณหภูมิห้องในขณะเดียวกันแผ่นแก้วต้องไม่มีความเครียดซึ่งจะทำให้สามารถคัดแผ่นแก้วได้โดยง่าย บรรจุภัณฑ์แก้วแล้วภาชนะที่ถูกขึ้นรูปโดยมีอุปกรณ์ช่วยดันน้ำแก้วในการขึ้นรูปจะต้องมีความเค้นที่ไม่มากเกินที่ทำให้บรรภัณฑ์อ่อนแอหรือเป็นสาเหตุที่ทำให้บรรจุภัณฑ์แก้วเองโดยธรรมชาติ ส่วนกระจกแว่นตาต้องทำให้แก้วเย็นตัวลงในขณะที่ดรรชนีการหักเหต้องคงที่และความเค้นต้องน้อยพอที่จะไม่ทำให้แก้วงอหรือบิดเบี้ยวในขณะที่ทำการฝนหรือขัด คุณสมบัติและขนาดของกระจกแว่นตาต้องคงที่ตลอดที่เวลาที่ยาวนาน ความเค้น คุณสมบัติทางกายภาพ และความเสถียรของแก้วถูกสร้างขึ้นในขณะที่แก้วผ่านกระบวนการทำให้ลดอุณหภูมิลงในช่วงขอบเขตการอบอ่อน วัตถุประสงค์หลักในการอบอ่อนแก้วคือ การทำให้แก้วมีความเค้นน้อยที่สุดโดยการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ในช่วงขอบเขตการอบอ่อน กระจกเทมเปอร์ถูกทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ทำให้แก้วมีความเครียดสูงโดยทำให้แก้วเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในช่วงขอบเขตการอบอ่อนซึ่งจะทำให้พื้นผิวของแก้วเทมเปอร์มีความเค้นแรงกดสูงจึงทำให้มีความทนทานต่อแรงทางกล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดีกว่าแก้วที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน

3.4.1 ธรรมชาติของแก้วและการคลายความเครียด

แก้วและการคายความเครียดถูกอธิบายโดย อดัมส์และวิลเลียมสัน [5]กล่าวไว้ว่า แก้วเป็นวัสดุอสัณฐานซึ่งที่อุณหภูมิปกติแก้วจะแข็งและไม่หยืดยุ่นจึงถูกจัดเป็นของแข็ง แต่ถ้าแก้วได้รับความร้อนแก้วจะค่อย ๆ อ่อนตัวลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นของเหลวหนืดและเป็นของเหลวในที่สุด ในระหว่างกระบวนการทำให้เย็นตัวลงแก้วจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากของเหลวกลายไปเป็นของแข็ง ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่า ‘ solidification ’ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นของสารเดี่ยวที่เกิดภายในสภาวะต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของของเหลวและไม่เกิดการตกผลึก สมมุติว่าแผ่นแก้วถูกทำให้ปราศจากความเค้นมีอุณหภูมิต่ำ ถูกให้ความร้อนที่พื้นผิวทั้งสองด้าน พื้นผิวชั้นนอกจะร้อนและเกิดการขยายตัวมากกว่าชั้นใน พื้นผิวของแผ่นแก้วเกิดการหดตัวโดยการหดตัวจะเกิดขึ้นทุกทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวแก้ว ในขณะเดียวกันแก้วชั้นในถูกยืดโดยแก้วชั้นนอก อย่างไรก็ตามความเค้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากแรงกดที่แก้วชั้นนอกไปเป็นแรงดึงที่แก้วชั้นใน ดังนั้นแก้วที่อยู่ชั้นล่างพื้นผิวจะเป็นชั้นที่ปราศจากความเค้นซึ่งเรียกว่าโซนกลาง ถ้าแผ่นแก้วถูกทะลุผ่านชั้นความหนาด้วยอุณหภูมิที่คงที่จะไม่พบความแตกต่างของอุณหภูมิและไม่พบว่ามีความเค้นเกิดขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าแก้วถูกทำให้เย็นตัวลงแรงดึงจะเกิดที่แก้วชั้นนอกส่วนแรงกดจะเกิดที่แก้วชั้นใน

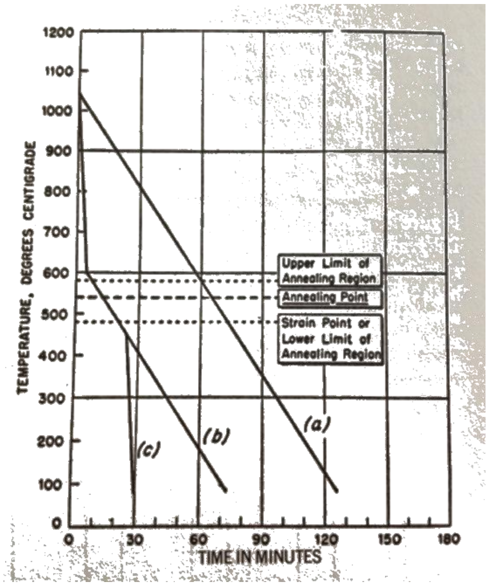
3.4.2 ความเครียดชั่วคราวและความเครียดถาวร

ส่วนมากพฤติกรรมของแก้วที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักแก้วจะไม่เกิดการไหลแต่จะมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งยืดหยุ่น ที่อุณหภูมิสูงแก้วจะเกิดการไหลโดยมีการเคลื่อนที่ของความเค้นภายใน มีการคลายออกอย่างค่อยเป็นค่อยไปโดยอัตราการคลายขึ้นอยู่กับความหนืด ดังนั้นการทำให้เกิดความเค้นในแผ่นแก้วโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิไม่ได้ทำให้เกิดความเค้นที่ถาวรโดยอุณหภูมิที่ทำให้แก้วกลายเป็นของเหลวจะเป็นช่วงที่ทำให้ความเค้นค่อย ๆ คลายลง ซึ่งความเค้นที่เหลือสุดท้ายจะเรียกว่าความเค้นถาวรซึ่งพิจารณา เช่น พิจารณาจากแผ่นแก้วที่อุณหภูมิ 650 °C (อุณหภูมิที่แก้วชนิดนี้จะไม่ปรากฏความเค้นขึ้นอย่างฉับพลัน) และสมมุติว่าผิวแก้วถูกทำให้เย็นตัวลงด้วยอัตราการคายความร้อนคงที่ภายใต้เวลาการอบอ่อนที่แน่นอนหลังจากการเริ่มเพิ่มหรือลดความร้อนอุณหภูมิจะกระจายเป็นพาลาโบลิคแล้วจะคงที่ในที่สุดตามระยะเวลาที่อุณหภูมิแก้วคงที่สมมุติว่าถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิในแผ่นแก้วอยู่ในจุดสมดุลในขณะที่แก้วยังอ่อนตัวจึงไม่สามารถเก็บรักษาความเครียดนั้นไว้ได้ทำให้เกิดเป็นความเครียดชั่วคราวจนเมื่อผิวแก้วเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ถ่ายเท

ผ่านแผ่นแก้ว ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นและจะเกิดแรงกดตามที่พื้นผิวนอกและแรงดึงที่พื้นผิวใน

3.4.3 ความเครียดขึ้นอยู่กับอัตราการคลายความร้อน

อดัมส์และวิลเลียมสัน ได้แสดงให้เห็นว่าความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการคลายความร้อนตามข้อมูลแสดงว่าที่แผ่นแก้วความหนา ¼ นิ้ว ส่วนผสมของแก้วประกอบด้วย 73% SiO_2, 1% K_2O, 14% Na_2O และ 12% CaO ซึ่งเป็นสูตรแก้วทางการค้าของแก้วแผ่นและแก้วกระจกหน้าต่าง เมื่อทำให้แก้วเย็นตัวลงด้วยอัตราคงที่ที่ 7.6 °C/min จะทำให้เกิดความเค้น3.8 kg/cm^2ซึ่งเป็นค่าที่ทางการค้ารับได้ รูปที่ 3.3 (a) แสดงให้เห็นว่าใช้เวลาในการอบอ่อน 126 นาที เพื่อลดอุณหภูมิจาก 1040 °C ลงมาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้อัตราการคายความร้อน 7.6 °C/min จากกระบวนการอบอ่อนนี้จะเห็นว่าเราเสียเวลาในการอบค่อนข้างมาก จึงน่าจะลดเวลาลงโดยยังคงให้ความเค้นสุดท้ายคงที่ด้วยการพิ่มอัตราการคายความร้อนในช่วงอุณหภูมิเหนือขอบเขตการอบอ่อนซึ่งจะเกิดความเค้นในช่วงเวลาสั้นและหลังจากนั้นให้ใช้อัตราการคายความร้อนเดิมตลอดจนถึงอุณหภูมิห้องจากรูปที่ 3.3 (b)ซึ่งสามารถลดเวลาในการอบลงจากเดิมได้ 42 % ต่อมา Littleton และ Roberts [6] ได้กำหนดอุณหภูมิที่ความเค้นน่าจะถูกคายออกในเวลา 15 นาทีจากจุดอบอ่อนโดยในช่วงเวลาดังกล่าวให้ใช้อัตราการคายความร้อนที่ต่ำและคงที่หลังจากนั้นสามารถลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วได้เนื่องจากเป็นจุดที่ทำให้แก้วแข็งตัวมากพอที่จะทำให้ความเค้นไม่สงผลต่อการเสียรูปซึ่งจากรูปที่ 3.3 (c) วิธีนี้สามารถลดเวลาลงจากเดิมได้ถึง 76 %

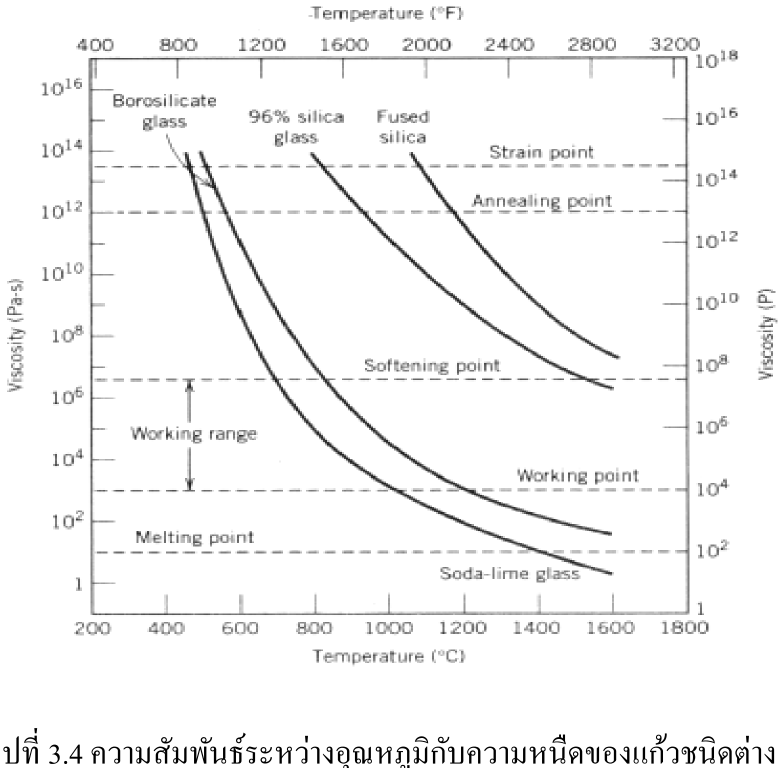


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบแผ่นแก้วที่ความหนา ¼ นิ้ว [9]

3.4.4 ผลของอุณหภูมิต่อความหนืดของแก้ว

ความหนืดของแก้วจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้ถูกทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากรูป 4.2 เป็นช่วงความหนืดที่มีความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการอบอ่อนโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. Melting point เป็นจุดที่แก้วมีความหนืด 10 Pa.s ซึ่งเป็นช่วงที่แก้วมีลักษณะเป็นของเหลว
2. Working point เป็นจุดที่แก้วมีความหนืด 10^{3} Pa.s ซึ่งเป็นช่วงที่แก้วมีความหนืดเหมาะสมในการขึ้นรูป
3. Softening point เป็นจุดที่แก้วมีความหนืด $10^{6.5}$ Pa.s ซึ่งเป็นช่วงที่แก้วสามารถไหลได้ด้วยอัตราเร็วพอสมควร ค่าความหนืด ณ จุดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นและแรงตึงผิวขอแก้ว
4. Annealing point เป็นจุดที่แก้วมีความหนืด 10^{12} Pa.s ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้แก้วสามารถแพร่อะตอมได้เร็วมากพอที่จะกำจัดความเค้นภายในให้หมดไปในเวลาอันรวดเร็ว
5. Strain point เป็นจุดที่แก้วมีความหนืด $10^{13.5}$ Pa.s เป็นช่วงอุณหภูมิสูงสุดที่แก้วจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วได้โดยไม่ทำให้แก้วเกิดความเค้นมากในชิ้นงาน



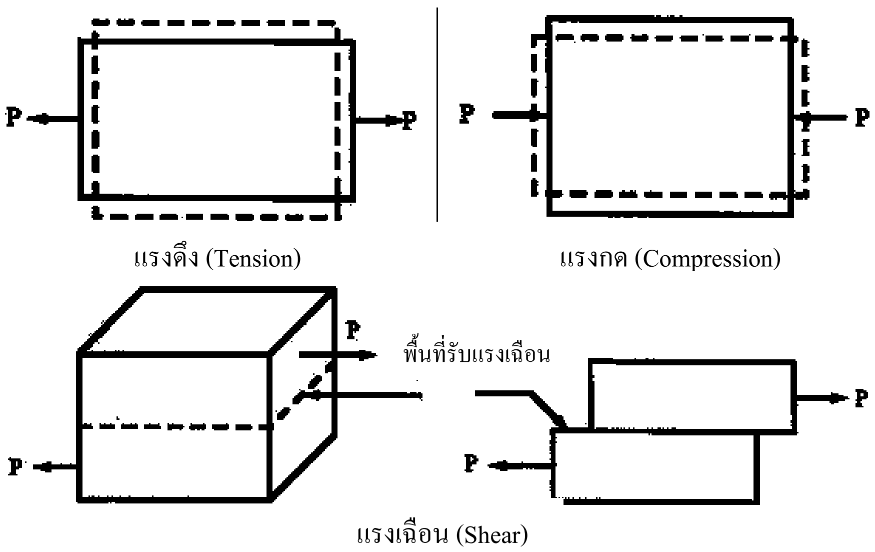
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของแก้วชนิดต่าง ๆ [11]

3.5 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Properties of Materials)

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ หมายถึง พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถแสดงออกมา เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็งแรง (Strength)ความเหนียวเป็นต้น (Ductility)เป็นต้น คุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากต่อการเลือกวัสดุที่จะนำไปใช้งานให้เหมาะสมและปลอดภัยกับงานประเภทนั้น ซึ่งประเภทของคุณสมบัติเชิงกลมีดังนี้

1. ความเค้น (Stress) หมายถึง ลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของวัสดุ เป็นความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ โดยแบ่งชนิดของความเค้นได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Stress หมายถึง ความเค้นแรงดึงที่เกิดจาก Tensile Force ที่มากระทำต่อวัสดุ
2. Compressive Stress หมายถึงความเค้นแรงกด หรือความเค้นแรงอัดที่มากระทำต่อวัสดุ
3. Shear Stress หมายถึงความเค้นแรงเฉือนเป็นความเค้นที่เกิดจาก Shear Force ที่มากระทำต่อวัสดุ
4. Bending Stress หมายถึงความเค้นแรงดัดเป็นความเค้นที่เกิดขึ้นต่อเมื่อชิ้นงานนั้นๆ ได้รับแรงดัด
5. Torsion Stress หมายถึงความเค้นแรงบิดเป็นความเค้นที่เกิดจาก Torque กระทำต่อวัสดุนั้นๆ



รูปที่ 3.5 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ [11]

2. ความเครียด (Strain) หมายถึง ความเครียดที่ปรากฏภายใต้แรงที่มากระทำต่อเนื้อของวัสดุจนวัสดุเกิดรับแรงนั้นไว้ไม่ไหวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ เช่นเกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction)โดยแบ่งชนิดของความเครียดได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Strain หมายถึง ความเครียดแรงดึงที่เกิดจาก Tensile Force ที่มากระทำต่อวัสดุ

2. Compressive Strain หมายถึงความเครียดแรงกด หรือความเครียดแรงอัดที่มากระทำต่อวัสดุ

3. Shear Stain หมายถึงความเครียดแรงเฉือนเป็นความเครียดที่เกิดจาก Shear Forceที่มากระทำต่อวัสดุความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation) ความเครียด (Strain) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

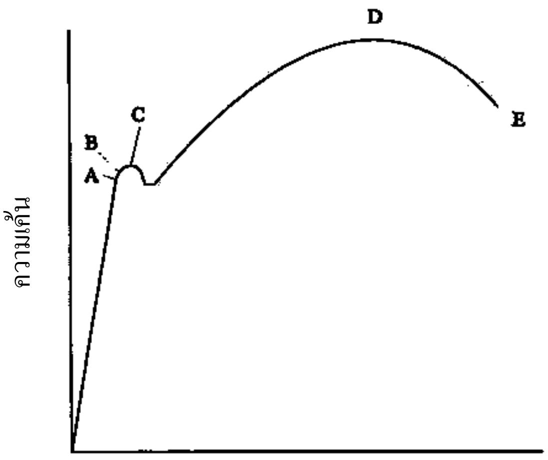
1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก หรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำอะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวกยางยืด, สปริงถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้นโดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติ -กรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำหรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ววัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้วยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติกเรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูปแต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1. แบบเส้นตรงความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่าความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกดค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

2. แบบเฉือนเรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะ

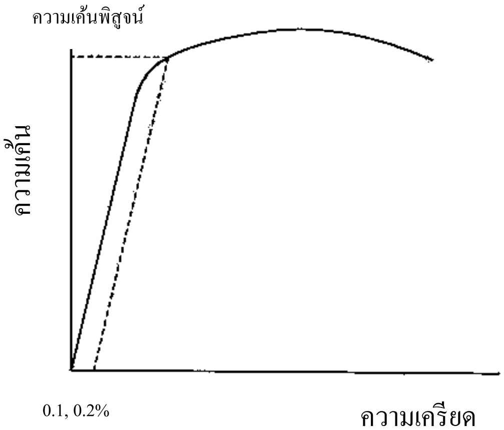
เป็นแรงเฉือนค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-StrainRelationship) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress -Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลักโดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้วยังจะแสดงถึงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.6 ความเค้นความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [11]

การทดสอบแรงดึง (Tension Test) วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆแล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.4 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก.(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย)ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วยจากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุค (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิกัด

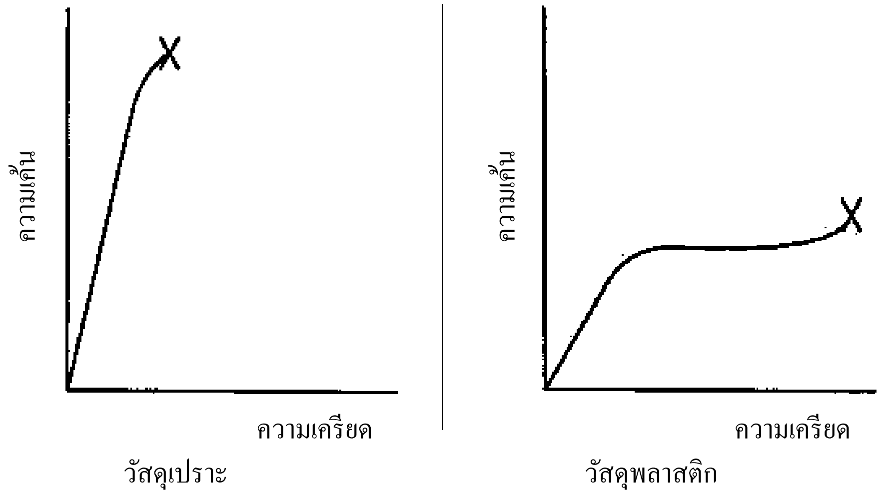
สัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วนเส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้นเมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิดเช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปและในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหายวัสดุหลายชนิดเช่นอะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งความเค้น ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก [11]

หลังจากจุดครากแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรง

ดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่าคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เองที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วยในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึงดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวางดทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิคที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลยส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น



รูปที่ 3.8 เส้นโค้งความเค้น ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [11]

เส้นโค้งความเค้น - ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีก

3. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซนต์การยืดตัว (Percentage

Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %El มากกว่า เพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมันคือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%El สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูปดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ, Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยากหรือทำไม่ได้ เป็นต้น

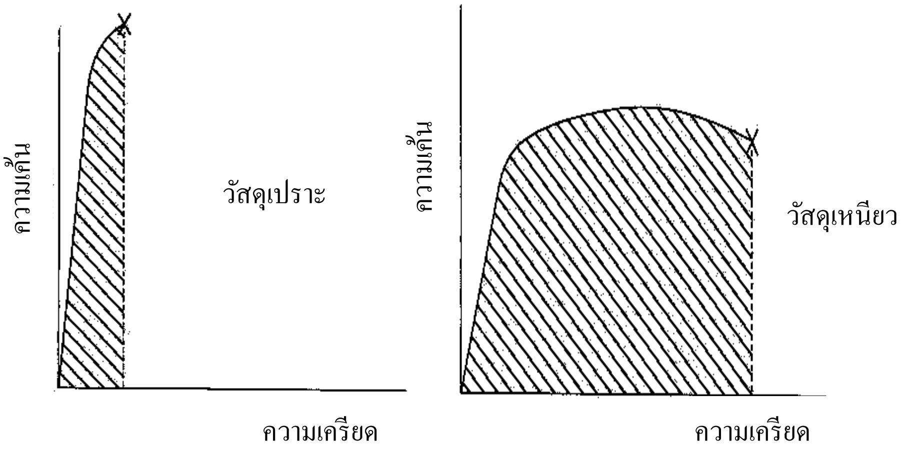
4. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้พิกัดสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm^{2}หรือ GPa ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำมันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

5. ความยืดหยุ่น (Flexible)หมายถึง การที่มีแรงจากภายนอกมากระทำจนเกิดการปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างชั่วคราว (Elastic Deformation) และเมื่อเราปล่อยแรงกระทำนั้นออกก็จะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เอง คุณบัติจะคล้ายๆกับการเป็นสปริงนั่นเอง

6. ความเปราะ (Brittleness)หมายถึง สมบัติเชิงกลอย่างหนึ่งของวัสดุที่รับแรงเพียงเล็กน้อยแล้วเกิดการขาดออกจากกัน เช่น เหล็กหล่อ แก้ว เป็นต้น โดยจะคิดจากค่า 5% ของความเครียดเป็นหลัก กล่าวคือวัสดุใดๆก็ตามที่เกิด การแตกหักก่อนค่า 5% ของความเครียดวัสดุนั้นก็จะมีความเปราะมาก นั่นเอง

7. ความแข็งแรง (Strength)หมายถึงความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงกดหรือแรงอัด สูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ซึ่งเราสามารถจะสังเกตุได้จาก Stress-Stain Curve ซึ่งตรงจุดแตกหัก(Breaking Point) นั้นเราจะเรียกกันว่าเป็นจุดความแข็งแรงที่จุดแตกหัก นั่นเอง

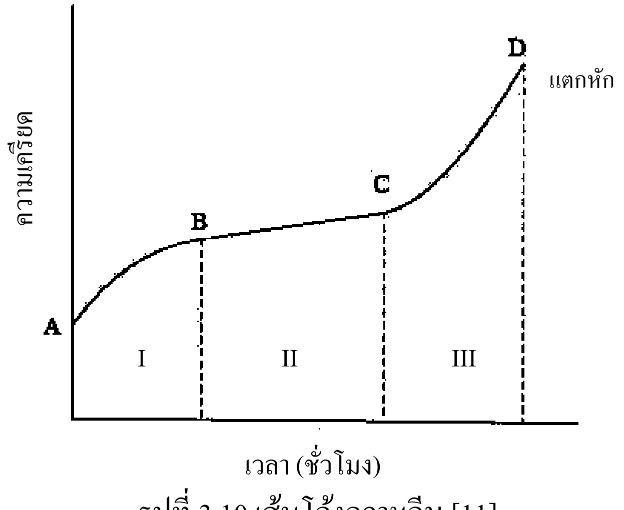
8. ความแกร่ง (Toughness)หมายถึงความสามารถของวัสดุที่จะดูดซึมพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวของมันโดยกำหนดว่า Modulus of Toughness เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้นความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of Toughness นี้จะแสดงถึงงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จนทำให้เกิดการแตกหัก ด้วยข้อกำหนดนี้จะแสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวที่มีความแกร่งสูงและวัสดุเปราะที่มีความแกร่งต่ำด้วย



รูปที่ 3.9 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ [11]

9. ความล้า (Fatigue) หมายถึง แรงที่กระทำต่อวัสดุเป็นจังหวะซ้ำๆจนวัสดุนั้นเกิดการเปราะและแตกหักในภายหลัง

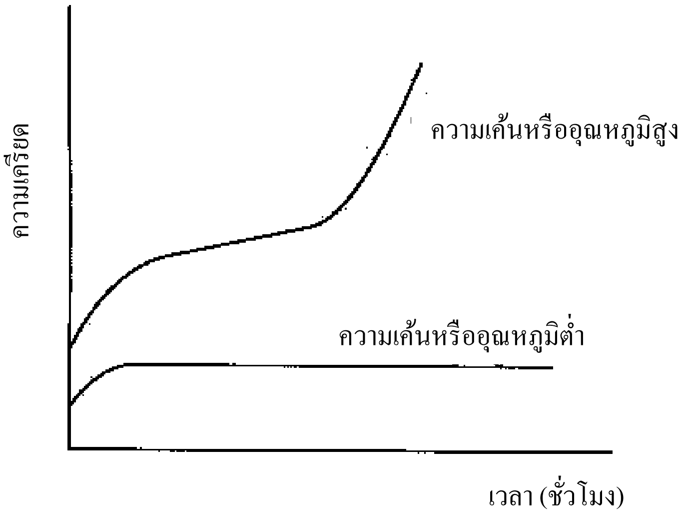
10. การคืบ (Creep)หมายถึงการเกิดความเครียดอย่างถาวร (Permanent Set) อย่างช้าๆภายในเนื้อของวัสดุที่ต้องรับแรงทางกลเป็นเวลาต่อเนื่องนาน ๆ และอุณหภูมิสูงจนกระทั่งเนื้อของวัสดุนั้นๆ เกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมภายในเนื้อของวัสดุจนกระทั่งเกิดการขาดจากกันไปในที่สุดหากให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน



รูปที่ 3.10 เส้นโค้งความคืบ [11]

เมื่อเราใช้แรงกระทำคงที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันทีซึ่งค่าความเครียด OA นี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้นและอุณหภูมิ) และจะมีความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในชั้นที่ I ซึ่งอัตรา

การเกิดความเครียดจะค่อย ๆ ลดลง (AB) ในขั้นที่ II (BC) อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิด Creep ขึ้น อัตราการเกิดความเครียดนี้เรียกว่า Minimum Creep Rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ III (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ที่จุด Dการเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะและเวลาที่ใช้



รูปที่ 3.11 เส้นโค้งความคืบที่สภาวะต่างกัน [11]

เส้นบนถ้าเราให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นหรืออุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ขั้นแต่เส้นล่างนั้นความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ขั้นนั่นคือจะไม่เกิดการแตกหักขึ้น ในกรณีของพวกโพลีเมอร์ อาจเกิดความคืบขึ้นได้แม้ที่อุณหภูมิห้อง แต่โลหะส่วนใหญ่และพวกเซรามิคจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำแต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้นการใช้พวกโลหะหรือเซรามิคที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย

11. ฮิสเตอริซิสทางกลหมายถึงพลังงานที่ถูกสะสมอยู่ภายในเนื้อของวัสดุอันเป็นสาเหตุมาจากวัสดุนั้นๆ ปล่อยพลังงานที่รับไว้กลับออกมาไม่หมดจึงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Thermal Energy) ออกมาแทนนั่นเองคุณสมบัติทางกลของวัสดุแก้ว ในทีนี้จะเพิ่มเติมหรือระบุค่าบางอย่างของวัสดุแก้ว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Elasticity แก้วเป็น elastic material ที่สมบูรณ์แบบคือแก้วจะไม่ เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร แต่แก้วมีความเปราะซึ่งหมายถึงแก้วจะแตกเมื่อได้รับความเค้น (stress) เพิ่มขึ้น

- Young's modulus, E เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดึงตามทฤษฎีที่ใช้ในการทำให้แก้วยืดออก

ให้ยาวขึ้นเท่ากับความยาวเดิมของมันหน่วยของมันจะมีค่าเป็นแรงต่อพื้นที่ สำหรับแก้วตามมาตรฐานยุโรปจะมีค่า E= 7 x 1010 Pa=70GPa

- Poisson's ratio : m (lateral contraction coefficient) เมื่อวัสดุถูกดึงด้วยแรงขนาดตามขวางของมันจะลดลง ค่า m คือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยที่ลดลงตามทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงกับหน่วยของความเครียด (strain) ตามทิศทางของแรง สำหรับแก้วในงานก่อสร้างค่า m = 0.22

- Compressive strength แก้วมีค่า compressive strength สูงมาก คือ 1000 N/mm^2 หรือ 1000 MPa นั่นหมายถึงในการทำให้แก้วขนาด 1 cm^3 แตกละเอียดลงได้ต้องให้น้ำหนักถึง 10 ตัน

- Tensile strength แก้วตามปกติจะมี tensile strength ประมาณ 40 MPa (N/mm^2) และอาจทำให้เพิ่มสูงขึ้นถึง 120 - 200 MPa เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงต่างๆ

3.6 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนคือ การถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 บริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยการถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนมีรูปแบบการถ่ายเท 3 แบบด้วยกัน คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสิความร้อน (Radiation) ปกติการถ่ายเทความร้อนจะไม่เกิดจากกลไกลถ่ายเทเพียงกลไกลเดียวแต่มักเกิดจากหลายกลไกลพร้อม ๆ กัน การศึกษาและแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในทางวิศวกรรมมักคำนึงถึงกลไกลการถ่ายเทที่ส่งผลกระทบมากที่สุด และมักไม่นำกลไกลทีส่งผลต่อการถ่ายเทในปริมาณน้อยมาคำนวณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและลักษณะของปัญหานั้น ๆ

1. การนำความร้อน (Heat Conduction) หมายถึงกระบวนการส่งถ่ายความร้อนจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยส่งถ่ายความร้อนผ่านตัวกลางจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องมีการเคลื่อนไหวของวัตถุตัวกลาง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัยตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งการนำความร้อนนี้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ทั้งในตัวกลางชนิดเดียวกันและตัวกลางต่างชนิดกันที่สัมผัสหรือมีการติดต่อกันโดยตรง การนำความร้อนอาจเกิดขึ้นพร้อมกับการถ่ายเทความร้อนวิธีอื่น ๆ ได้ เช่น การพาความร้อนมักพบในการถ่ายเทกรณีที่ตัวอย่างในการถ่ายเทไม่เป็นของแข็ง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการแผ่รังสีความพร้อมขึ้นกับวิธีการถ่ายเทอื่น ๆ ด้วย ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier’s Law)

กฎของฟูเรียร์ กล่าวไว้ว่าสำหรับการนำความร้อนโดยอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_x)ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้น ๆ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อนนั้น ๆ (A)และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางทิศทางดังกล่าว (dT/dx)ด้วยเช่นกัน

$$Q_x \propto A\frac{dT}{dx}$$

สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงที่ (Steady State)อุณหภูมิภายในตัวกลางให้แปรผันตรงกับทิศทาง x อยู่ในรูป T = T(x) จากกฎของฟูเรียร์ จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนตามสมการต่อไปนี้

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx}$$

ฟลักซ์ของความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จาก

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

จากสมการข้างต้น ถ้าอุณหภูมิขอตัวกลางลดลงตามทิศทาง + X พบว่าค่าของ dT/dx เป็นลบ ดังนั้นถ้า Q_xหรือ q_x มีเครื่องหมาย + แสดงว่า Q_xหรือ q_x มีทิศทางการไหลทิศ + X ภายใต้สภาวะคงที่และตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่ อุณหภูมิ T (X) เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นดังรูป 3.4.1 ดังนั้น

$$q_x = -k\frac{dT}{dx} = \frac{T2 - T1}{L} = \frac{-(T1 - T2)}{L} = -k\frac{\Delta T}{L}$$

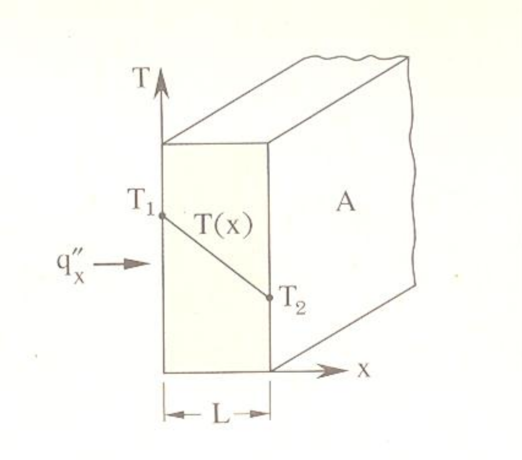
Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

q = ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

k = ค่าคงที่การนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity)เป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุชนิดนั้น ๆ (W/mK)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุที่ถ่ายเทความร้อน (K)

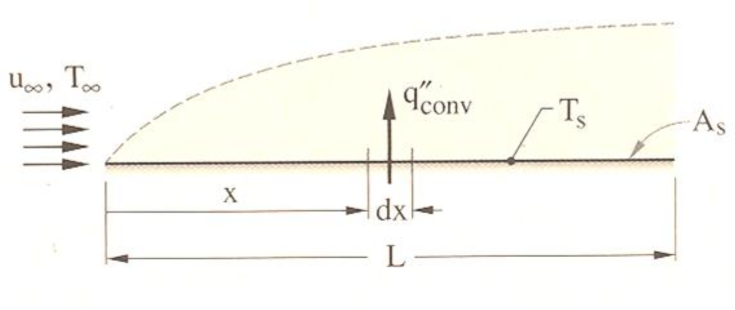
L = ความหนาของวัสดุ (m)



รูปที่ 3.12 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด X [10]

2. การพาความร้อน (Heat Convection) หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหลทั้งของเหลวและก๊าซ ผลการเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น (h, W/m^2 K)พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (diffusion)ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของของไหล การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธียังส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายพลังงานโดยเคลื่อนจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนจึงสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural Convection)คือ การเคลื่อนไหวของของไหลเป็นผลมาจากแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในระบบ อันเป็นผลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ
- การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced Convection)คือ กล ไกลการเคลื่อนไหวของของไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมกับทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อน แรงภายนอกดังกล่าวเกิดจากอุปกรณ์ช่วยต่าง ๆ เช่น เครื่องสูบ เครื่องเป่าลม เป็นต้น การพาความร้อนโดยการบังคับจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการพาความร้อนตามธรรมชาติ



รูปที่ 3.13 การพาความร้อนในชั้นชิดผิวความร้อนและชั้นชิดผิวความเร็ว [10]

พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งบนพื้นที่ A_sและอุณหภูมิผิว T_s ขณะของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว u_∞ และอุณหภูมิ T_∞ คงที่ ดังนั้นฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่คำนวณเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's Law of Cooling)

$$q = h(T_s - T_\infty)$$

$$Q = h_m A_s (T_s - T_\infty)$$

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

q = ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (W/m^2 K)

h_m = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m^2 K)

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [10]

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ (W/m^2 K)
การพาตามธรรมชาติ	5 - 25
การพาโดยการบังคับ	
ก๊าซ	25 - 250
ของเหลว	50 - 20000
การพาขณะเปลี่ยนแปลงเฟส	
(เดือดและควบแน่น)	2500 - 100000

3. การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากผิวตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกผิวตักลาหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีความร้อนถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave)หรือในรูปของโปรตอน โดยการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้ไม่ต้องอาศัยวัสดุเป็นตัวกลางในการถ่ายเท ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนจึสามารถเกิดการถ่ายเทได้ในสภาวะสุญญากาศ การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้ก็เป็นการถ่ายเทความร้อนจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกับ 2 วิธีที่กล่าวมาแล้ว

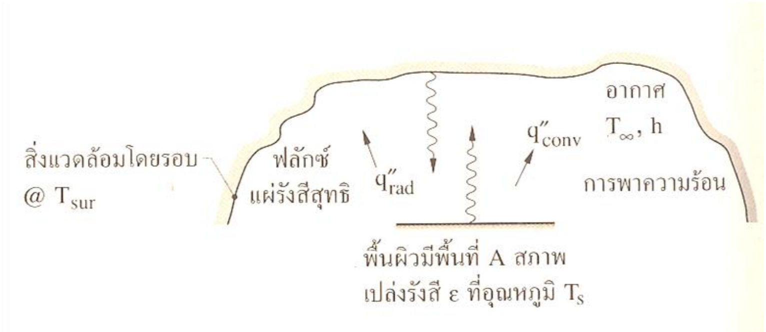
4. การคำนวณหาฟลักซ์ของการแผ่รังสีความร้อนออกจากผิวตัวกลาง สามารถคำนวณได้จากกฎของชเตฟาน – โบลต์ซมันน์ (Stefan - Boltzmann)ดังนี้

$$q_{rad} = \sigma T_s^4$$

T_s = อุณหภูมิพื้นผิวในการแผ่รังสี (K)

σ = ค่าคงที่ของชเตฟาน – โบลต์ซมันน์ (5.67×10^{-8} W/m^2 K^4)

จากสมการข้างต้นสามารถใช้ได้กับกรณีตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiation)หรือวัตถุดำ (Black Body)สำหรับกรณีของพื้นผิวของตัวแผ่รังสีจริง (Real Surface)ฟลักซ์รังสีจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้จะขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivty) ของพื้นผิวนั้น (ε) ด้วย ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงคำนวณจาก $q_{rad} = \varepsilon\sigma T_s^4$



รูปที่ 3.14 การแผ่รังสีความร้อนแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ [10]

พิจารณาการแลกเปลี่ยนรังสีกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_sมีสภาพเปล่งรังสี ε กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ T_{sur}อัตราการแผ่รังสีสุทธิบนพื้นผิว A คือ

$$q_{net} = \frac{Qrad,net}{A} = \varepsilon\sigma\,(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

จัดรูปสมการให้ง่ายขึ้นโดยใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมาช่วย สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$Q_{rad,net} = h_r A(T_s - T_{sur})$$

$$h_r = \varepsilon\sigma\,(T_s + T_{sur})\,(T_s^2 - T_{sur}^2)$$

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

q = ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

h_r = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (W/m^2 K)

ถ้าหากระหว่างพื้นผิว A กับสิ่งแวดล้อมเป็นก๊าซ จะมีการพาความร้อนซึ่งจะเกิดร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนด้วย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดสุทธิออกจากพื้นผิว A สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_{rad,net}$$

$$Q_{tot} = h\,A\,(T_s - T_\infty) + \varepsilon\,A\sigma\,(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

3.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม

ปัจจุบันการแก้ปัญหาในทางวิศวกรรมมักนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์และช่วยในการคาดคะเนผลล่วงหน้ามาประยุกต์ ซึ่งโปรแกรมต่าง ๆ เหล่านี้มีประโยชน์เป็นอย่างมากทำให้ช่วยลดความเสี่ยงและลดค่าใช้จ่ายในการทดลองหรือปฏิบัติงานจริง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในทาวิศวกรรมมีหลายประเภทและโปรแกรม เช่น CAD, Hysis, CAE, CAM STAR – CD และ Comsol Multiphysics เป็นต้น

Comsol Multiphysics Simultion เป็นโปรแกรมที่พัฒนามาจากวิธีแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง กลศาสตร์ของไหล การวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า การถ่ายเทความร้อน และปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

การแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่มีรูปแบบเป็นปัญหาเงื่อนไขค่าเริ่มต้น จะคล้ายคลึงกับการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่มีรูปแบบเป็นปัญหาเงื่อนไขค่าเริ่มต้น เทคนิคทั่วไปคือการ

เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้กลายเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (กล่าวคือ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย 1 สมการจะถูกแปลงเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญจำนวนหลายสมการ ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของคำตอบที่ต้องการ) สิ่งที่ควรระวังคือ หลายวิธีการที่ใช้ได้ดีกับกรณีของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญไม่สามารถนำมาใช้ได้ดีกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ เนื่องจากประสบปัญหาด้านเสถียรภาพ การแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่มีรูปแบบเป็นปัญหาเงื่อนไขค่าขอบเขตมักจะใช้เทคนิคที่ทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้กลายเป็นระบบสมการพีชคณิต (กล่าวคือ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย 1 สมการจะถูกแปลงเป็นสมการพีชคณิตหลายสมการ ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของคำตอบที่ต้องการ) จากนั้นจึงพิจารณาระบบสมการพีชคณิตที่ได้ว่าเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น แล้วจึงเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมต่อไป

เทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขที่สำคัญมี 2 วิธี คือ Finite Difference และ Finite element ระเบียบวิธี Finite Difference มีความง่ายในการประยุกต์ใช้ แต่ถ้าต้องการให้ได้ความถูกต้องสูงจำเป็นต้องทำการแบ่งบริเวณที่หาคำตอบออกเป็นช่วงแคบ ๆ ทำให้อาจมีปัญหาได้กับการแก้ปัญหาบางแบบเพราะจำนวนสมการจะมีเป็นจำนวนมาก ส่วนระเบียบวิธี Finite element นั้นมีมีความยุ่งยากกว่าในการประยุกต์ใช้ แต่สามารถให้คำตอบที่มีความถูกต้องที่สูงได้โดยไม่ต้องทำการแบ่งบริเวณที่ต้องการทราบคำตอบออกเป็นช่วงที่เล็กมาก จึงมีจำนวนสมการน้อยกว่า เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาก็น้อยกว่าตามไปด้วย

3.7.1 ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไงขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ โดยแบ่ง Domain ของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ (Element) แต่ละ Element จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ (Node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการ Finite Element สำหรับแต่ละ Elment บน Domain จากนั้นทำการแก้ระบบสมการดังกล่าว ได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบน Domain หลักการคือทำการเปลี่ยนค่า Domain ของปัญหาทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนนับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยอลิเมนต์(Element) ซึ่งมีขนาดต่างกันได้ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อช่วยในการออกแบบเนื่องจากสามารถแก้ไขปัญหาข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้
ข้างต้นนั้นขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบ ได้แก่

1.1 ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) ที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหานั้น เช่น กรณีการวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้นประกอบด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แสดง

ถึงการอนุรักษ์มวลโมเมนตัม และพลังงาน สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ล้วนประกอบด้วยพจน์ต่างๆ ที่อยู่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ (Derivative Terms) ดังเช่น ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลแบบหนืดภายใต้สภาวะอยู่ตัวในสามมิติโดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้มีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นระบบสมการซึ่งขึ้นแก่กันและกัน(Coupled Equations) และอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) อันมีผลต่อเนื่องทำให้การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นมีความซับซ้อนมากตามขึ้นไปด้วย

1.2 เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions)สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา

นั้นในกระบวนการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไปเงื่อนไขขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกันกรณีศึกษาการออกแบบระบบระบายความร้อนภายในกล่องเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 กรณี กรณีแรกเมื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศด้านล่างของกล่องเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อให้เกิดลักษณะการไหลของอากาศภายในแตกต่างไปจากการติดตั้งพัดลมดูดอากาศด้านข้างของกล่องเครื่องคอมพิวเตอร์ในกรณีที่ 2อันเนื่องมาจากเงื่อนไขขอบเขตของการติดตั้งพัดลมใน

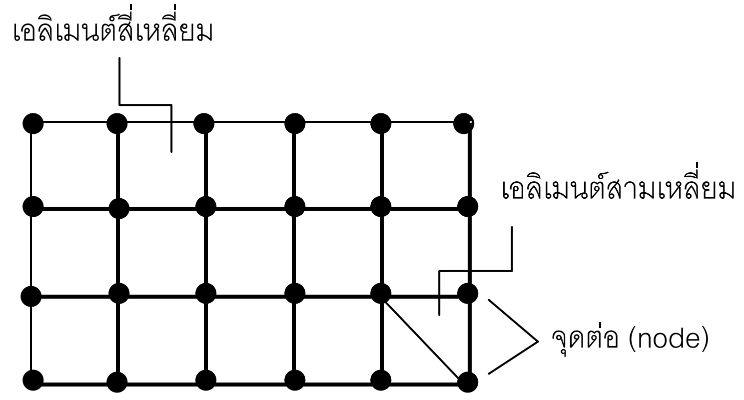
1.3 ลักษณะรูปร่าง (geometry) ของปัญหาหากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นผู้ที่จะทำการวิเคราะห์จึงต้องมีความเข้าใจกับองค์ประกอบทั้ง 3 องค์ประกอบอย่างลึกซึ้งเพื่อให้เกิดความมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ รูปแบบของปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลโดยทั่วไปในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ล้วนมีรูปร่างที่ซับซ้อนหากลักษณะรูปร่างซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของการไหลมีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้พฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกันถึงแม้ว่าระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขตยังเป็นเช่นเดิม

จากองค์ประกอบทั้ง 3 องค์ประกอบด้านบน สามารถสรุปวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ว่าเป็นวิธีการแก้ไขที่ต้องมีสมการการควบคุม ใช้สมการเงื่อนไข และเลือกลักษณะรูปร่างที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนง่ายได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ปัญหาและประเภทสมการเชิงอนุพันธ์ที่จะนำมาแก้ไขปัญหา เช่น การวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะคงที่ การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

2. การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ โดยต้องเลือกว่าจะใช้เอลิเมนต์ในลักษณะ 2 หรือ 3 มิติ แล้วจึงวิเคราะห์ว่าสมการดังกล่าวจะแสดงผลเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น และจะเลือกใช้เป็นคาน เซลล์ (Shell)หรือ เพลท (Plate)เป็นต้น เช่น การหาการกระจายตัวของแผ่นโลหะซึ่งมีฟังก์ชั่นการกระจายตัว

แบบเชิงเส้น แบ่งโดเมนออกเป็นเอลิเมนตย่อย ๆ เพื่อให้ง่ายในการหาคำตอบโดยจะมีจุดเชื่อมในการทำให้เกิดเอลิเมนต์ (Nodes)ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะหาค่าตัวแปรตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.15 การแบ่งเอลิเมนต์ในลักษณะในวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [14]

3. วิเคราะห์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับปัญหา โดยสมการนี้สร้างขึ้นเอลิเมนต์ที่แบ่งย่อยมีขนาดไม่เท่ากันหลังจากนั้นรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกันเป็นสมการระบบใหญ่ แล้วจึงพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตของปัญหามาประยุกต์ใช้ในการแก้สมการเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อแต่ละจุด

4. คำนวณค่าที่เกี่ยวอื่น ๆ นำไปประยุกต์ใช้หาค่าหรือปริมาณที่สามารถหาความสัมพันธ์กันได้ เพื่อนำไปสู่พารามิเตอร์ที่ต้องการต่อไปปัจจุบันได้มีการนำการแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประดิษฐ์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปจำหน่ายจำนวนมาก โปรแกรมเหล่านี้ทำการหาผลลัพธ์ด้วยการแก้องค์ประกอบหลักทั้งสามดังกล่าวข้างต้น โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประกอบด้วย 3ขั้นตอนใหญ่ ๆคือ

1. ขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขตซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) กระบวนขั้นต้นเริ่มจากการสร้างโดเมนของการไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์เป็นขั้นตอนนับตั้งแต่การจากการสร้างเส้นขอบ (line) การสร้างพื้นผิว (surface) รวมไปถึงการสร้างปริมาตร (volume) หากเป็นการไหลในสามมิติ จากนั้นจึงแบ่งโดเมนของการไหลที่ได้สร้างขึ้นนี้ออกเป็นเอลิเมนต์ (element) เล็ก ๆ หรือออกเป็นตาราง (mesh) ย่อย ๆ โดยเส้นตารางเหล่านี้ตัดกันที่จุดต่อ (grid หรือ node) แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของของไหล และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหานั้นตามลำดับ

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา (Analysis) ขั้นตอนการวิเคราะห์จัดได้ว่าเป็นหัวใจของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเหล่านี้เป็นการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์เข้าแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาผลลัพธ์ของการไหลที่จุดต่อ อันได้แก่ ความเร็ว ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น

3. ขั้นตอนของกระบวนการขั้นท้าย (Post-processor) เพื่อการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนของการวิเคราะห์การไหลนั้นโดยปกติจะมีจำนวนมากซึ่งขึ้นโดยตรงกับจำนวนของจุดต่อและต่างล้วนอยู่ในรูปแบบของค่าตัวเลขหากต้องการเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะการไหลจะต้องนำค่าเหล่านี้มานำเสนอพร้อมกันซึ่งสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ ได้แก่การพล็อตเวกเตอร์ ณ ทุก ๆจุดต่อตลอดทั้งโดเมนของการไหลเพื่อแสดงขนาดและลักษณะทิศทางของการไหลการพล็อตด้วยเส้นชั้น (contour lines) เช่นตัวอย่างของการกระจายของอุณหภูมิในห้องโดยสารในรถยนต์ส่วนบุคคลในรูปที่ 2 ฯลฯการนำเสนอเหล่านี้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ช่วยให้เกิดความเข้าใจในปัญหาได้อย่างรวดเร็วทำให้ผู้วิเคราะห์ทราบถึงสาเหตุของปัญหาอันจะนำไปสู่แนวทางการปรับปรุงแก้ไขให้ดียิ่งขึ้น

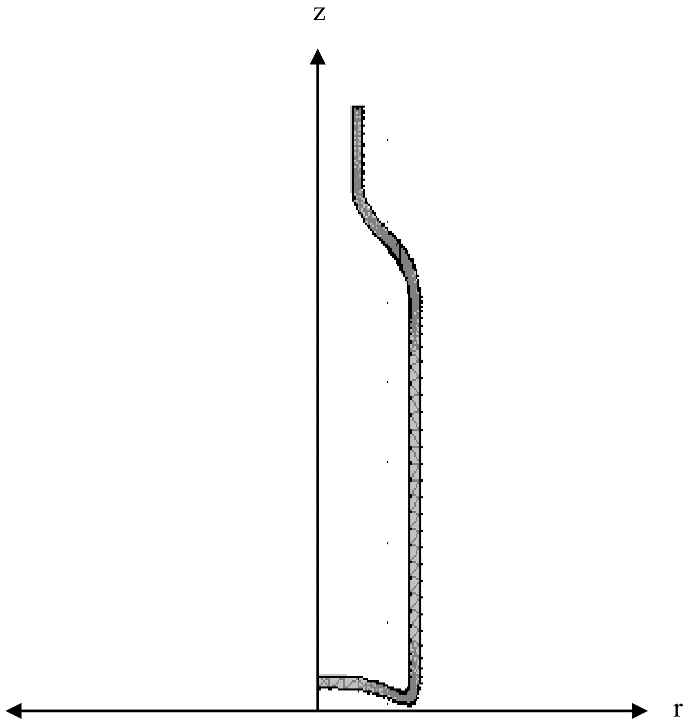
3.7.2 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาความร้อน

ปัญหาด้านความร้อนหรือการถ่ายเทอุณหภูมินับเป็นปัญหาที่สำคัญและมักส่งผลกระทบโดยตรงต่อวัสดุที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเป็นปัญหาดังกล่าวจึงเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการศึกษาทั้งในด้านการถ่ายเทความร้อน หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ นอกจากนี้สมการเชิงอนุพันธ์ที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหามีความยุ่งยากและซับซ้อนไม่มากนัก ประกอบกับการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้สามารถตรวจสอบได้ง่าย จึงทำให้การพัฒนาซอฟแวร์ด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นที่นิยมใช้ของผู้สนใจการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ประโยชน์จากการนำซอฟแวร์ที่ใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยแก้ไขปัญหาทางด้านความร้อน นอกจากความแม่นยำ ความรวดเร็ว ที่ทำให้ทราบการถ่ายเทความร้อนหรือการกระจายตัวของอุณหภูมิของวัตถุนั้น ๆ แล้ว ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ในส่วนทีเกี่ยวข้องได้อีกมากมาย เช่น ความสามารถในการขยายตัวหดตัว การนำความร้อน ความเครียดในเนื้อวัสดุ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบหรือพัฒนากระบวนการผลิตให้ดีขึ้นได้

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภายในเตาอบอ่อนมีกระบวนการถ่ายเทความร้อนจาก Inner cover สู่แก๊ส LPG และถ่ายเทความร้อนต่อไปยังบรรจุภัณฑ์แก้ว ซึ่งกระบวนการการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเป็นกระบวนการเชิงพลวัตโดยกำหนดให้การกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นเป็นไปในรูปสองมิติตามแนวแกน r และ z ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 บรรจุภัณฑ์แก้ว (สองมิติสมมาตรตามแนวแกน r และ z)

ภายในบรรจุภัณฑ์แก้วไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนดังนั้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อนจึงพิจารณาการถ่ายเทพลังงาน 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นมีดังนี้

จากสมการสมดุลพลังงานในแนวพิกัดทรงกระบอก

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T_g}{\partial t}+u_r\frac{\partial T_g}{\partial r}+\frac{u_\theta}{r}\frac{\partial T_g}{\partial \theta}+u_z\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)=\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_r r\frac{\partial T_g}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(k_\theta\frac{\partial T_g}{\partial \theta}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)\right)-\left(\frac{\partial \ln\rho}{\partial \ln T}\right)_p\frac{Dp}{Dt}-(\tau:\nabla v) \tag{4.1}$$

สมมุติฐาน :

1. ρ = ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์แก้วมีค่าคงที่

2. $k_r = k_z$= ค่าการนำความร้อนของบรรจุภัณฑ์แก้วมีค่าคงที่

3. $u_\theta = 0$; เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของบรรจุภัณฑ์แก้ว

4. $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$; ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วในแนวแกน θ

5. $\left(\frac{\partial \ln\rho}{\partial \ln T}\right)p\frac{Dp}{Dt} = 0$; เนื่องจากเหล็กมีสถานะเป็นของแข็ง

6. $\tau : \nabla v = 0$; เนื่องจากเหล็กไม่มีการเคลื่อนที่ ($v = 0$)

จากสมมุติฐานข้างต้นจะได้สมการดังนี้

$$\rho Cp\frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho Cp\left(u_r\frac{\partial T_g}{\partial r} + u_z\frac{\partial T_g}{\partial z}\right) = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_r r\frac{\partial T_g}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)\right) \tag{4.2}$$

เงื่อนไขขอบเขต:

ที่เวลา t = 0 ;

$$T_s = T_a \tag{4.3}$$

$$u_r, u_z = 0 \tag{4.4}$$

ที่เวลา t > 0 ;

ที่ตำแหน่ง $r = R_o$

$$k_r\frac{\partial T_g}{\partial r} = q_{cnv}(T_a, T_g) + q_{rad}(T_g, T_{wall}) \tag{4.5}$$

ที่ตำแหน่ง $r = R_i$

$$k_r\frac{\partial T_g}{\partial r} = q_{cnv}(T_a, T_g) + q_{rad}(T_g, T_{wall}) \tag{4.6}$$

ที่ตำแหน่ง Z = 0, L

$$k_z\frac{\partial T_g}{\partial z} = q_{cnv}(T_a, T_g) + q_{rad}(T_g, T_{wall}) \tag{4.7}$$

จากสมการการเคลื่อนที่ของ Cuachy ในแนวพิกัดทรงกระบอก

$$\rho\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\right) - \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\right) = F\upsilon \tag{4.8}$$

สมมุติฐาน :

1. ρ = ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์แก้วมีค่าคงที่

3. $u_\theta = 0$; เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของบรรจุภัณแก้ว

4. $\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0$; ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วในแนวแกน θ

6. Fυ = 0 ; เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อบรรจุภัณฑ์แก้ว

จากสมมุติฐานข้างต้นจะได้สมการดังนี้

$$\rho(\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}) - (\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}) = 0 \quad (4.9)$$

เงื่อนไขขอบเขต:

ที่เวลา t = 0 $u_r, u_z = 0$ (4.10)

ที่ตำแหน่งR = 0, Z = 0 $u_r, u_z = 0$ (4.11)

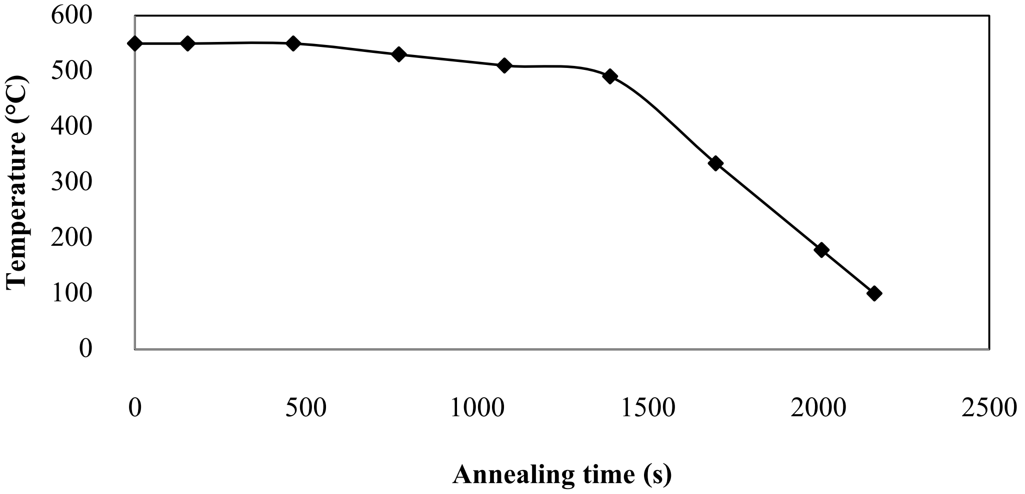
ρ คือ ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์แก้ว (kg/m^3), Cp คือ ความจุความร้อนของบรรจุภัณฑ์แก้ว (J/kgK), u คือ การกระจัดของบรรจุภัณฑ์แก้ว (m), $k_r = k_z$ คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบรรจุภัณฑ์แก้วในแนวแกน r และ z (W/mK), T_g , T_a, และ T_{wall} คือ อุณหภูมิบรรจุภัณฑ์แก้ว อุณหภูมิบรรยากาศภายในเตาอบ และอุณหภูมิผนังเตา (°C), σ_r, σ_z คือความเค้นในแกน r และ z (MPa), q_{cvn} และ q_{rad} คือ พลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

บทที่ 5

แบบอุณหภูมิอบอ่อน

แบบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้วมีความสำคัญต่อการเกิดความเค้นในกระบวนการอบอ่อนเป็นอย่างมาก เพราะนอกจากจะช่วยให้บรรจุภัณฑ์แก้วคายความเค้นได้แล้วยังมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการอบอ่อนด้วย ในที่นี้จึงได้ทำการศึกษาแบบอุณภูมิอบอ่อน 2แบบดังและพัฒนาแบบอุณหภูมิเพิ่มอีก 1 แบบโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

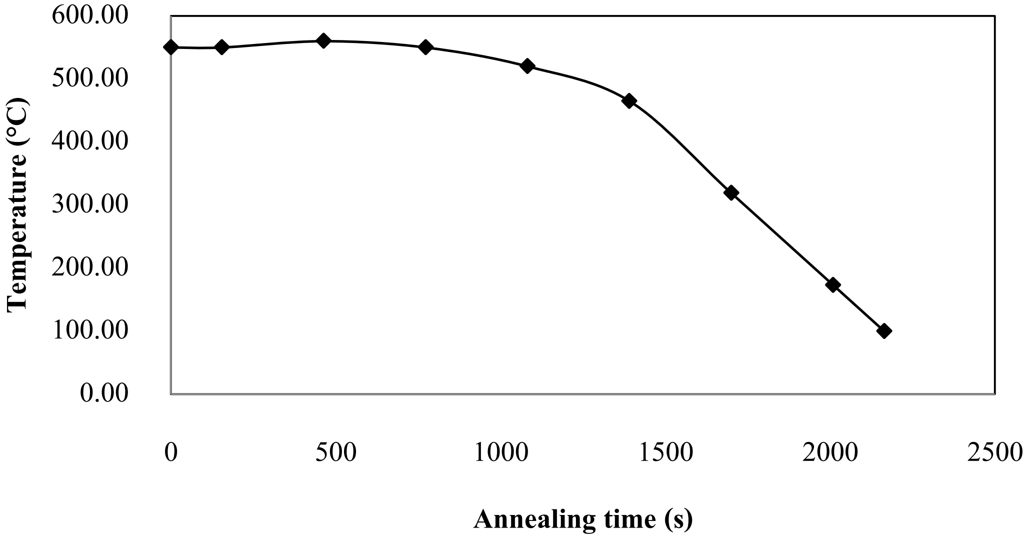
1. แบบอุณหภูมิ American Glass Research, Inc. (ARG) กำหนดให้จุด annealing point อยู่ที่ 550 °C จุด strain point อยู่ที่ 495 °C และจุดสุดท้ายก่อนออกจาก lehr ให้เป็น 100 °C ส่วนอัตราการคายความร้อนคือ ให้ความร้อนคงที่ในช่วง 5 – 8 นาทีแรก (ความหนาแก้ว 3 - 4มม.)แล้วใช้อัตราคายความร้อนที่ต่ำและคงที่จนเลยถึงอุณหภูมิที่ 490 °C (จุดที่ต่ำกว่า strain point มา 5 °C) ในที่นี้อัตราการคายความร้อนที่ 0.06 °C/s แล้วจึงลดอุณหภูมิบรรจุภัณฑ์แก้วลงอย่างรวดเร็วในอัตราคงที่ที่ 0.51 °C/s จนถึงอุณหภูมิที่ 100 °C ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังนี้



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ AGR

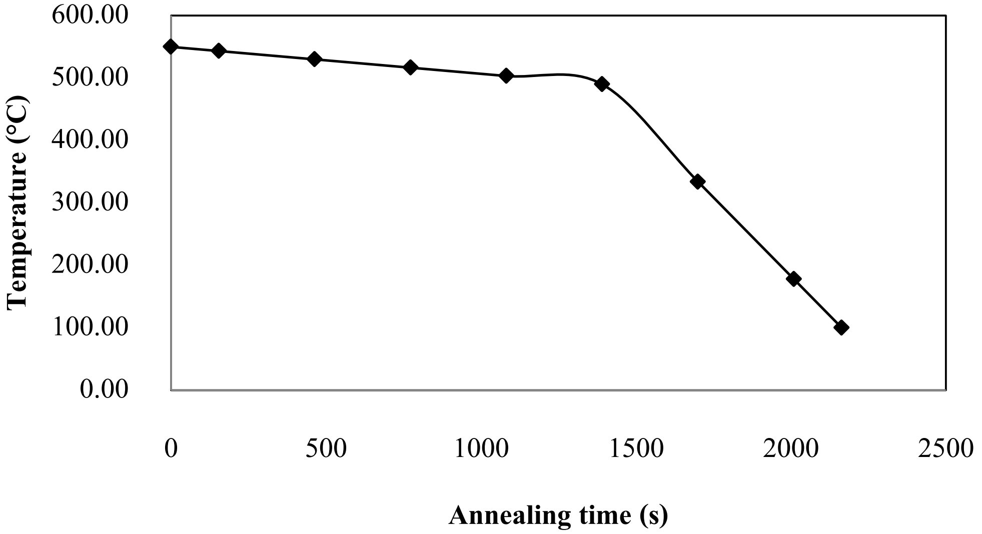
2. แบบอุณหภูมิ In Process (IP) จากความต้องการลดพลังงานที่ใช้ในการอบอ่อนจึงได้มีการปรับอุณหภูมิโดยใช้ annealing point ที่ 560 °Cและ strain point ที่ 470 °C และให้อุณหภูมิสุดท้ายเป็น 100 °C กำหนดให้ความร้อนคงที่เป็นเวลา 3 นาทีแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 560 °C หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงโดยใช้อัตราการคายความร้อนที่ต่ำเป็น 0.03, 0.1 และ 0.18 °C/s ตามลำดับ หลังจากเลย

อุณหภูมิที่ 465 °C (จุดที่ต่ำกว่า strain point 5 °C) ให้คายความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยอัตราคงที่ที่ 0.47 °C/s จนถึงอุณหภูมิที่ 100 °C ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังนี้



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ IP

3. แบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น (DT) จากความต้องการลดพลังงานที่ใช้ในการอบอ่อนโดยให้บรรจุภัณฑ์แก้วมีคุณสมบัติหลังการอบอ่อนอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ จึงได้มีการปรับแบบอัตราการคายความร้อนให้ต่ำและคงที่ในช่วงขอบเขตการอบอ่อนโดยใช้ annealing point ที่ 550 °C และ strain point ที่ 495 °C และให้อุณหภูมิสุดท้ายเป็น 100 °C กำหนดให้ความร้อนต่ำและคงที่ที่ 0.04 °C/s จากอุณหภูมิ 550 °C จนถึง 490 °C (จุดที่ต่ำกว่า strain point 5 °C) หลังจากนั้นให้คายความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยอัตราคงที่ที่ 0.50 °C/s จนถึงอุณหภูมิที่ 100 °C ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังนี้



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอบอ่อนแบบ DT

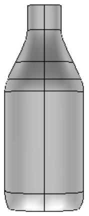
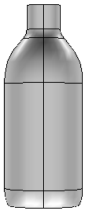
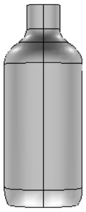
บทที่ 6

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในบทที่ 6 แสดงผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยโดยจะกล่าวถึงหัวข้อหลัก ๆ ดังนี้

- ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้ว
- การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้น
- ผลการจำลองการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วท
- การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิที่ใช้จริงในกระบวนการผลิตกับแบบอุณหภูมิที่ได้จากแบบอุณหภูมิ [8] และแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น
- การเปรียบเทียบความหนาของบรรจุภัณฑ์แบบความหนาสม่ำเสมอและความหนาไม่สม่ำเสมอที่ส่งผลต่อการเกิดความเค้นในกระบวนการอบอ่อน

ตาราง 6.1 ลักษณะทางกายภาพของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ A, B และ C ที่ทำการศึกษา

แบบขวด	**น้ำหนัก (กรัม)**	**เส้นผ่านศูนย์ภายนอก (มม)**	**ความสูง (มม)**	**ความหนาไหล่-ลำตัว-ก้น (มม)**	**รูปทรง**
A	177	58	180	2-2-2,3-3-3, 4-4-4 1-1-4, 2-2-4, 3-3-4	
B	180	60	178	2-2-2, 3-3-3, 4-4-4 1-1-4, 2-2-4, 3-3-4	
C	178	58	177	2-2-2, 3-3-3, 4-4-4 1-1-4, 2-2-4, 3-3-4	

6.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วในกระบวนการอบอ่อน

ในการทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใส ความหนา 3 มม. จากแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง (IP) โดยทำนายผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจากสมการ 4.2 และ 4.9 และโปรแกรม Comsol Multiphysics

แบบจำลองอุณหภูมิคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว

$$\rho \mathrm{Cp}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}}+\rho \mathrm{Cp}(\mathrm{u_r}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{r}}+\mathrm{u_z}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}) = (\frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}(k_r \mathrm{r}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{r}})+ \frac{\partial}{\partial \mathrm{z}}(k_z\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}))$$

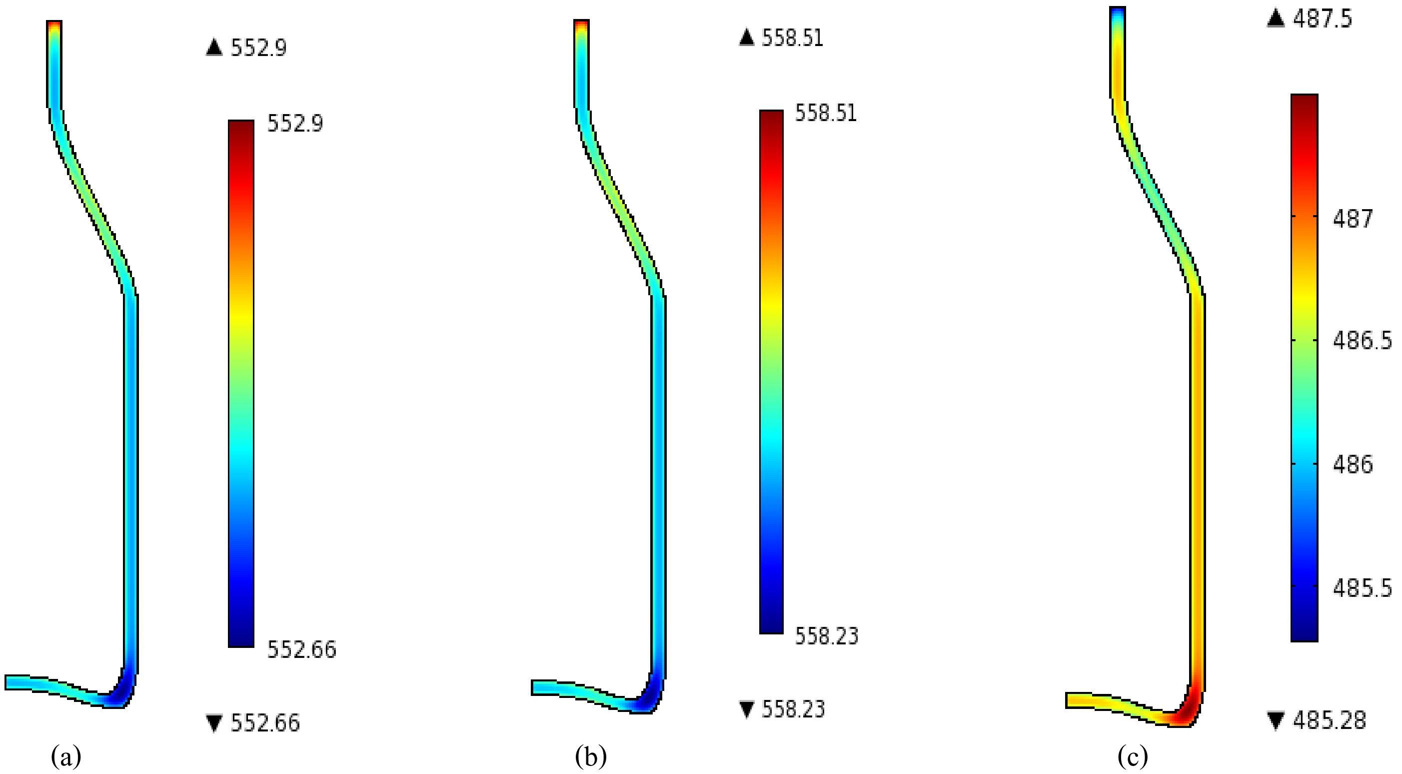
แบบจำลองความเค้นทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว

$$\rho(\frac{\partial^2 \mathrm{u_r}}{\partial \mathrm{t}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{u_z}}{\partial \mathrm{t}^2}) - (\frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}(\mathrm{r}\sigma_\mathrm{r}) + \frac{\partial \sigma_\mathrm{z}}{\partial \mathrm{z}}) = 0$$

6.1.1 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้ว

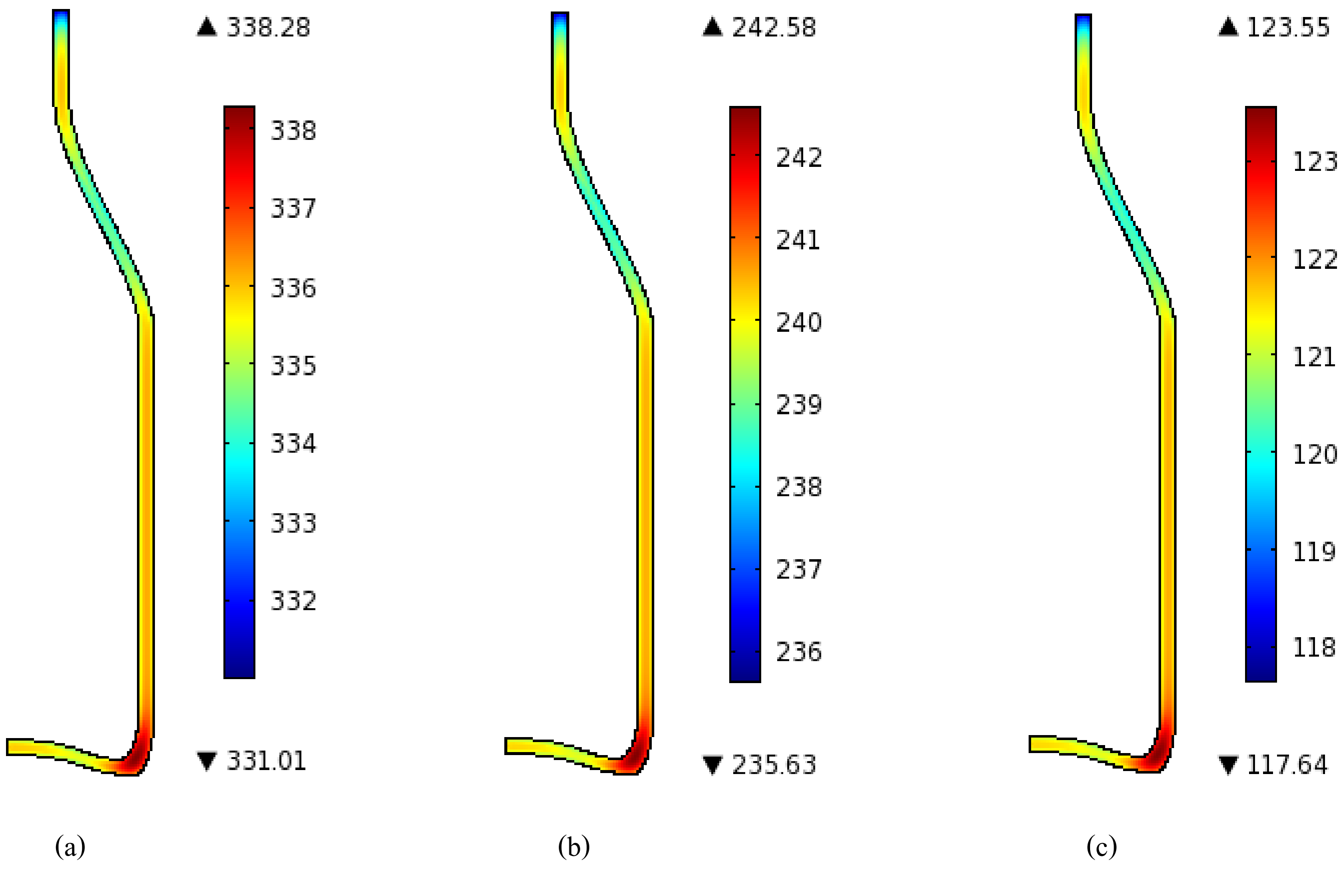
ในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 3 มม. จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแถบสีต่าง ๆ จะแสดงถึงอุณหภูมิ (°C) ของบรรจุภัณฑ์แก้ว แกน X คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายและภายนอก แกน Y คือความสูงของบรรจุภัณฑ์แก้วซึ่งผลการทำนายอุณหภูมิ ณ เวลาต่างมีดังนี้

6.1.1.1 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



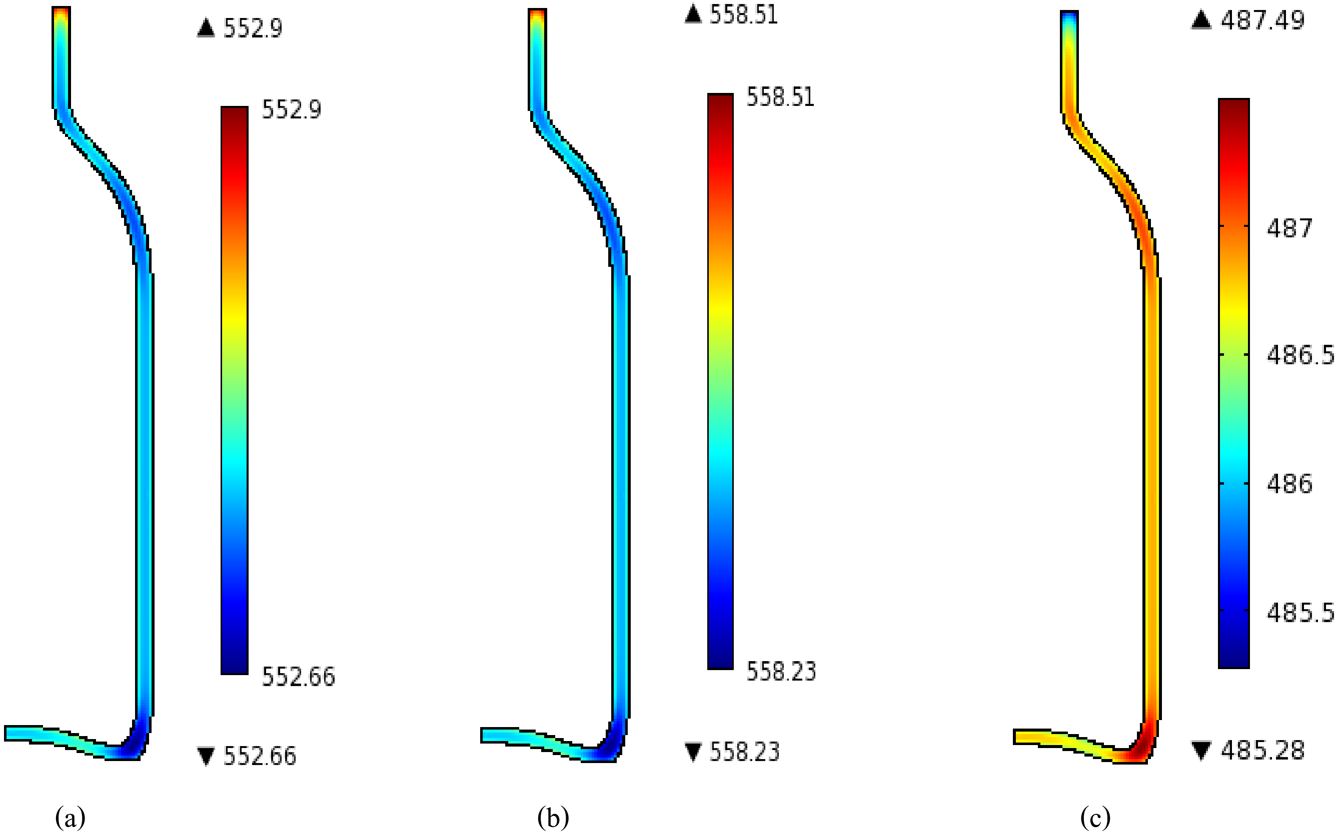
รูปที่ 6.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.1.1.1 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



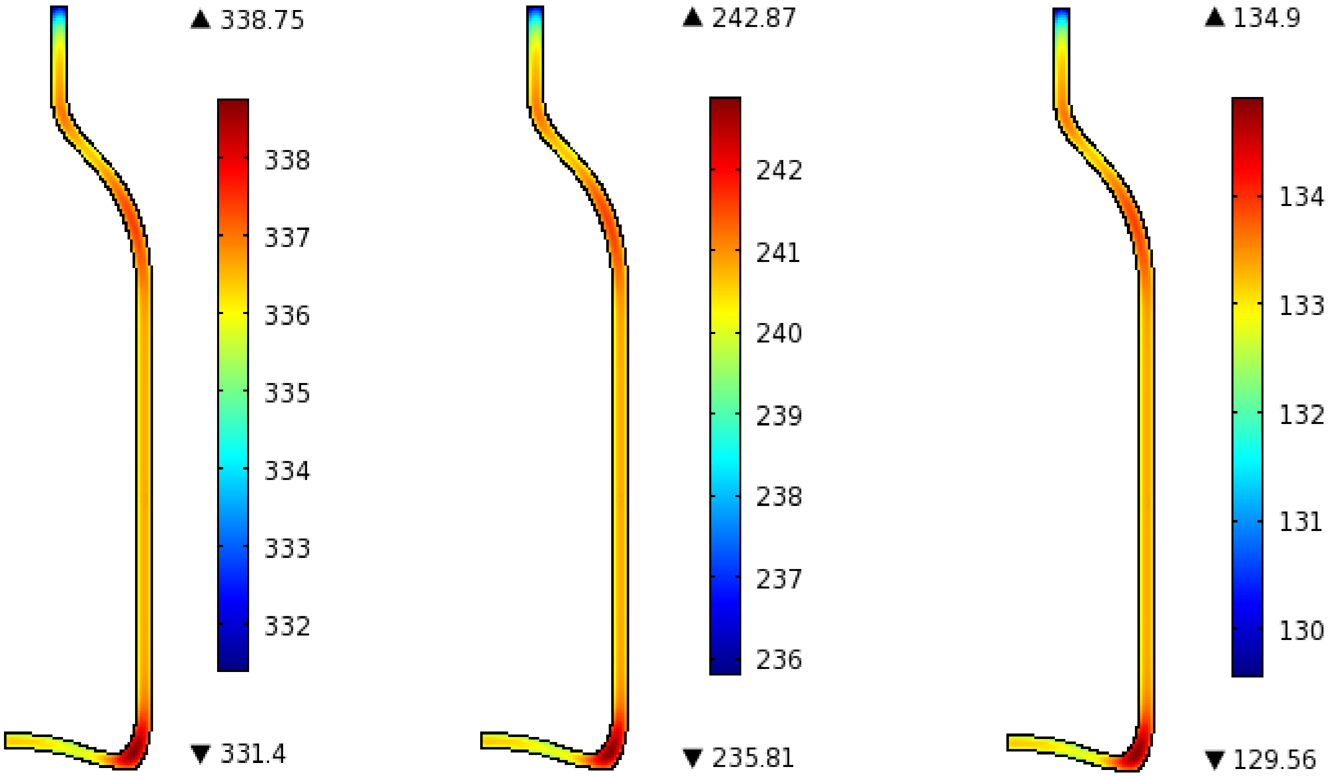
รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.1.1.2 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



รูปที่ 6.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

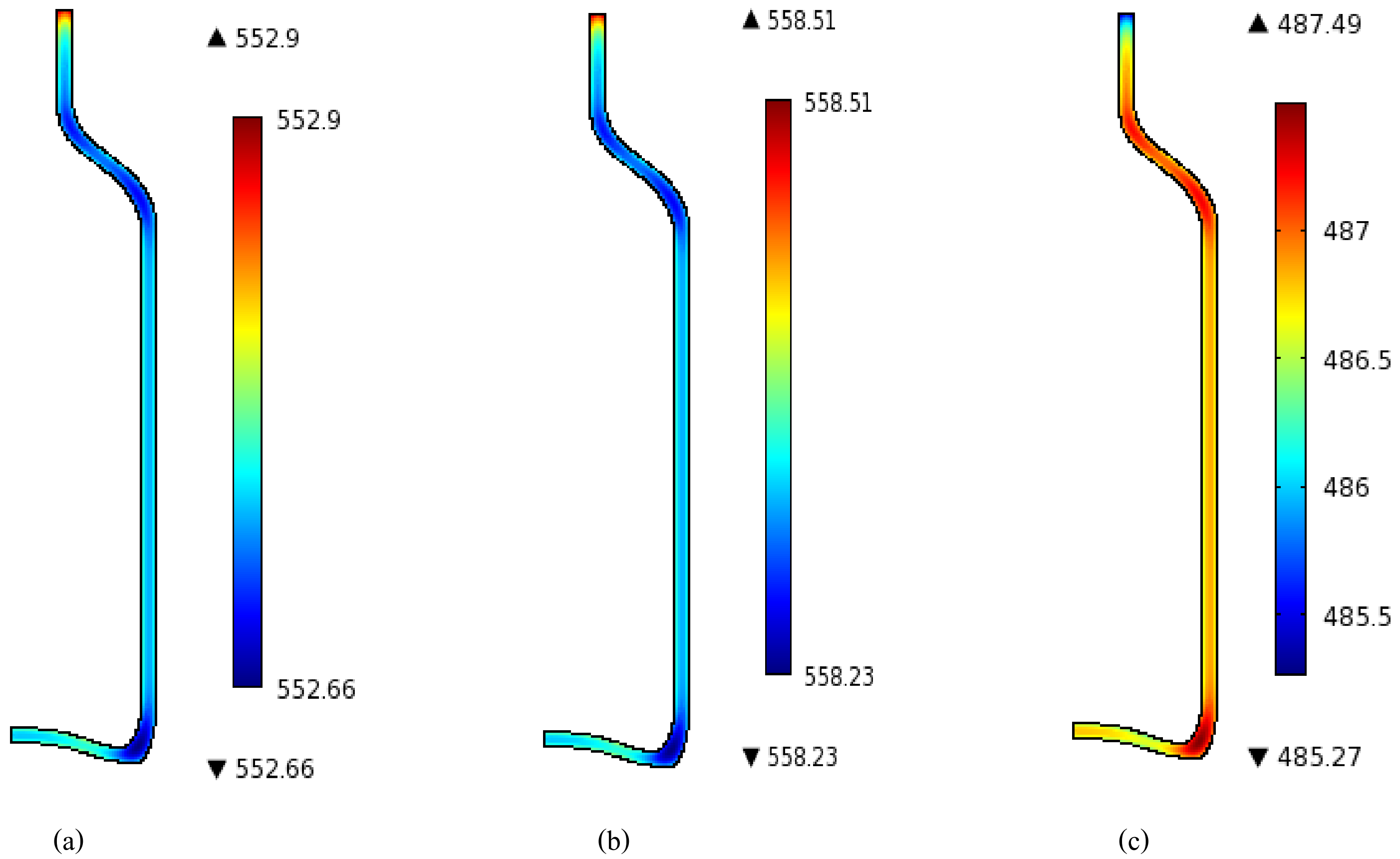
6.1.1.2 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



(a) (b) (c)

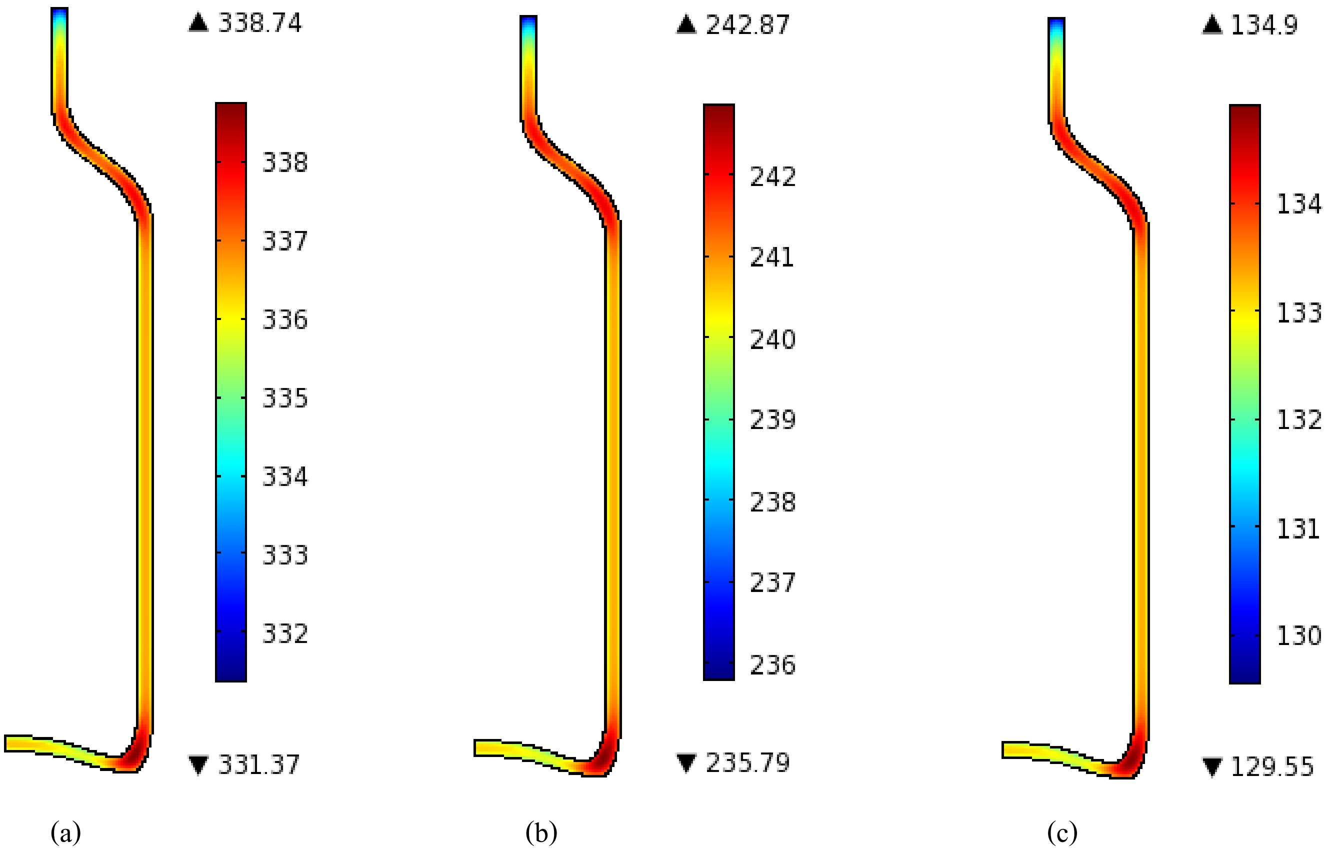
รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.1.1.3 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Cจากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.1.1.3 ผลการทำนายอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C

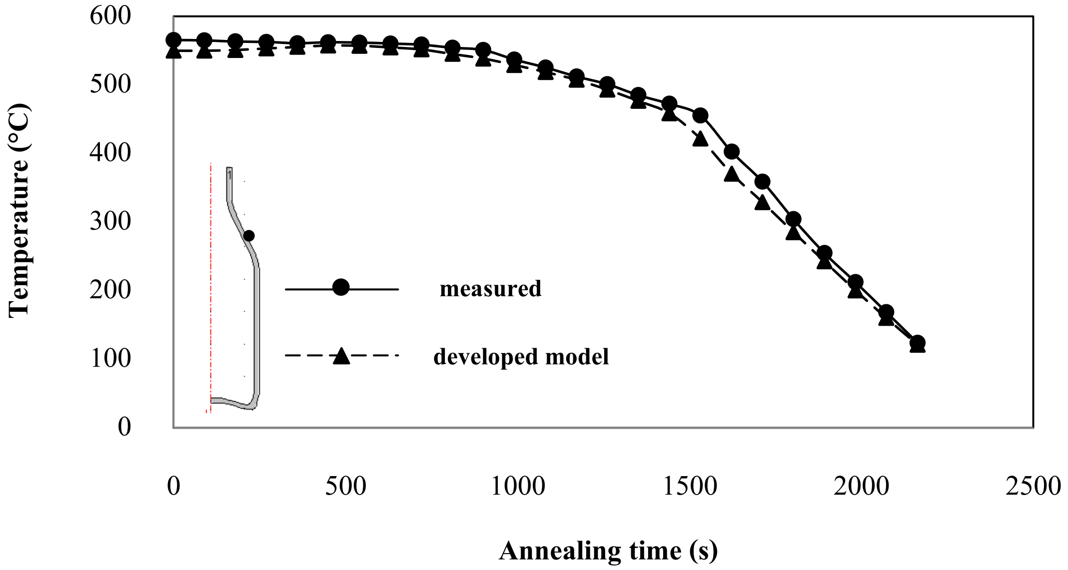


รูปที่ 6.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

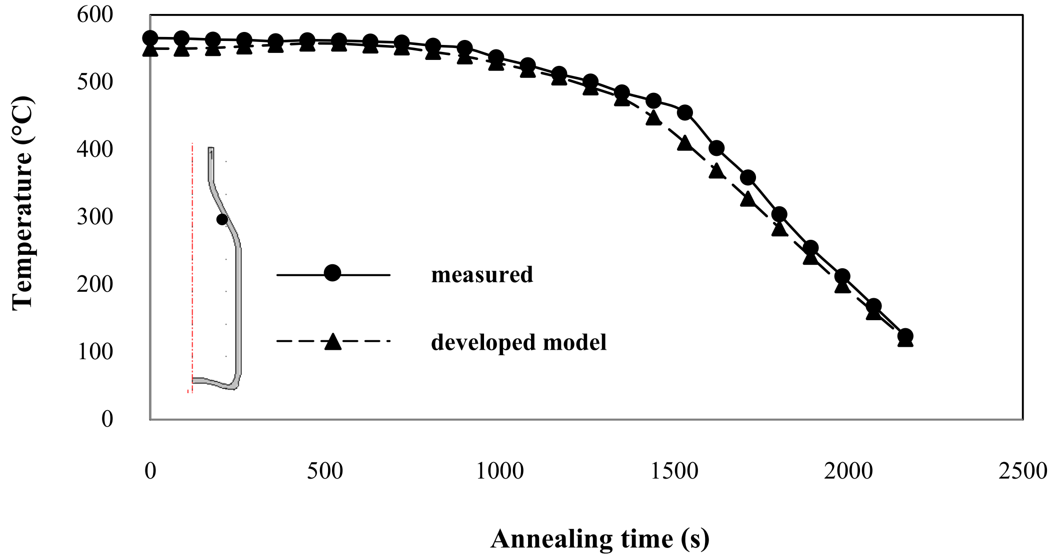
6.1.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้ว

ผลการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งผิวด้านนอกและด้านในเมื่อแสดงผลในรูปแบบกราฟมีผลดังนี้

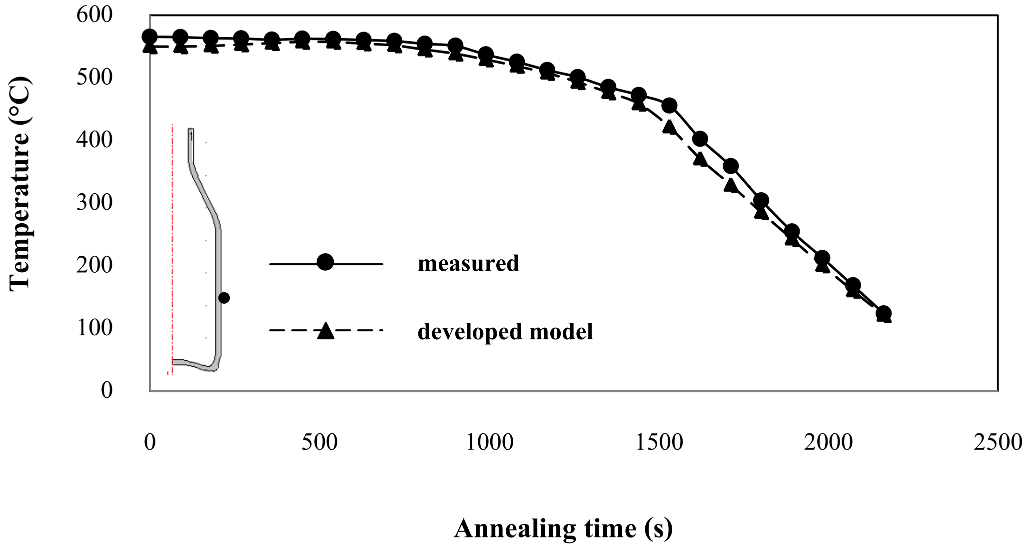
6.1.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบA



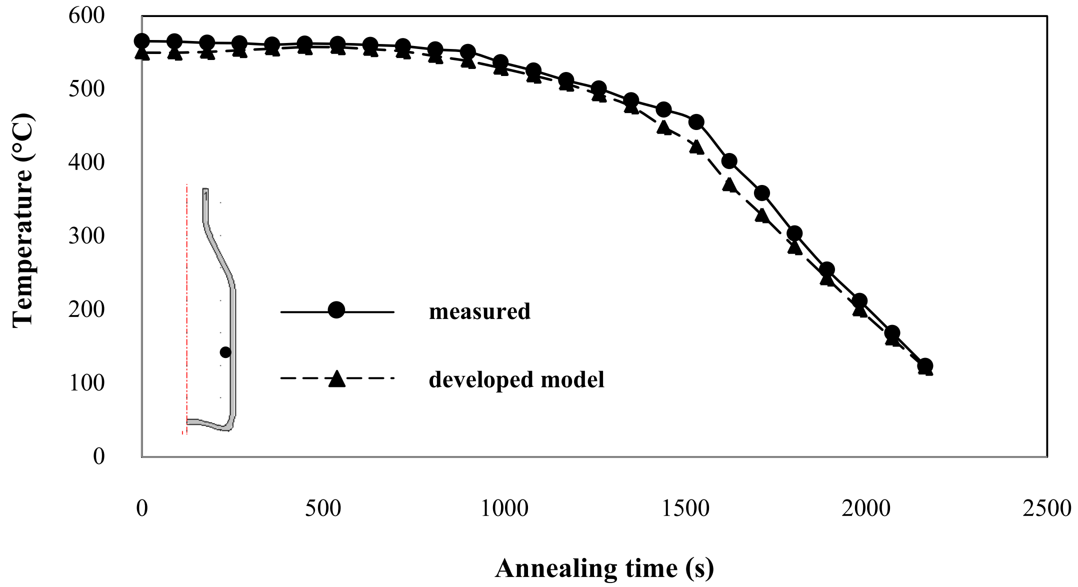
รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



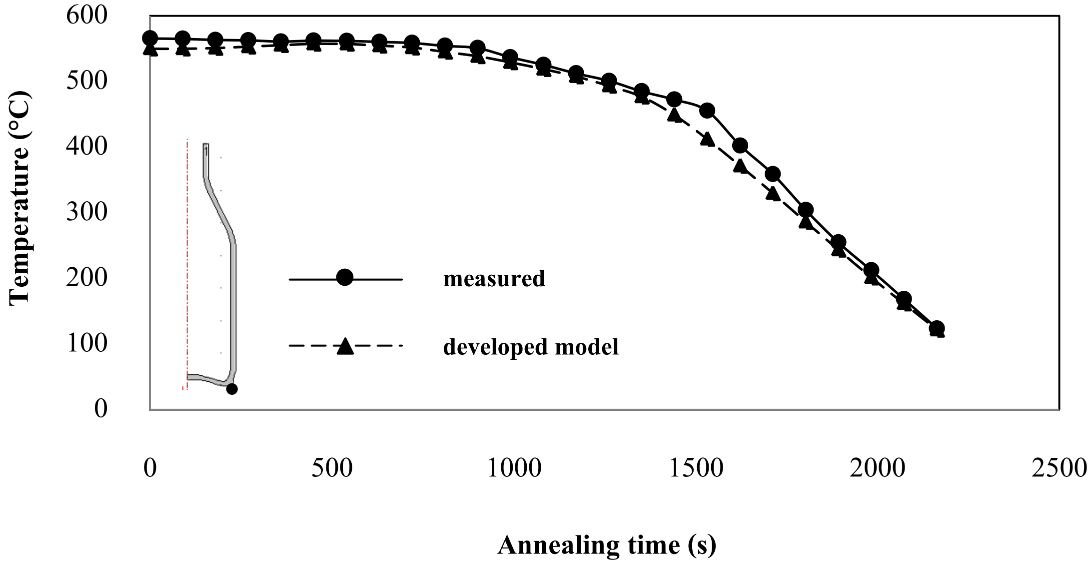
รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



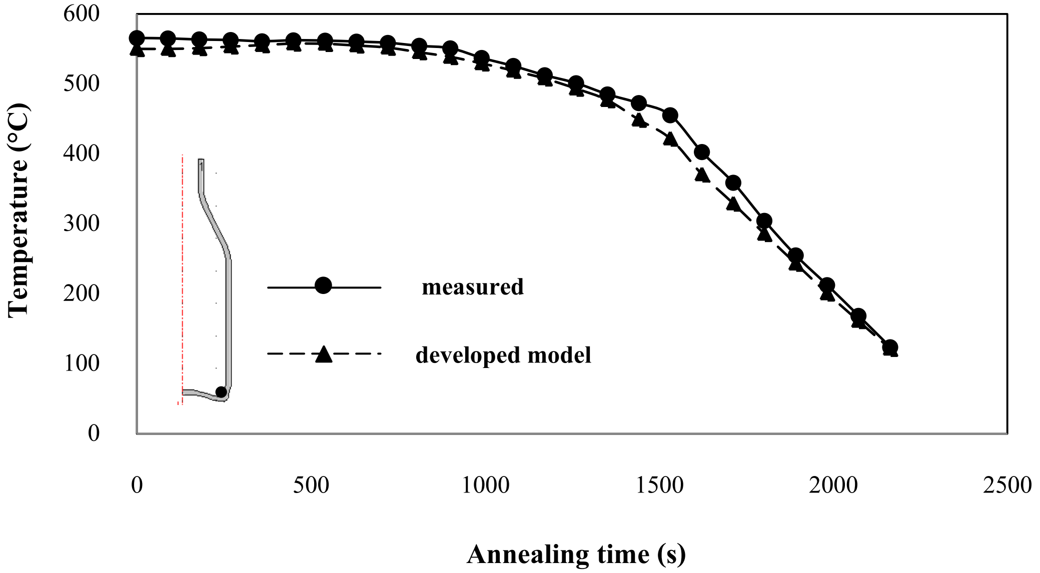
รูปที่ 6.9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



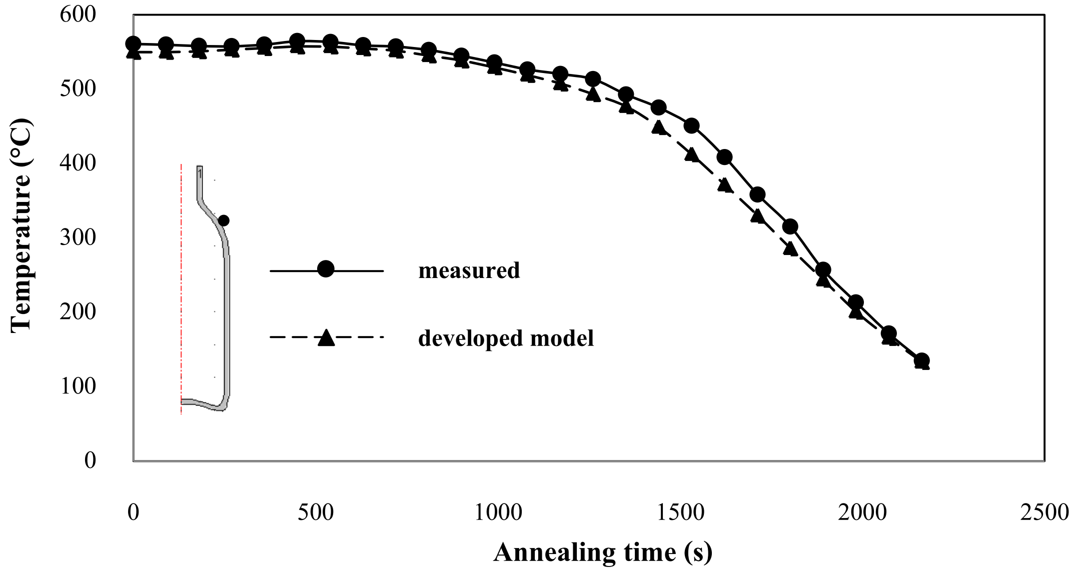
รูปที่ 6.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



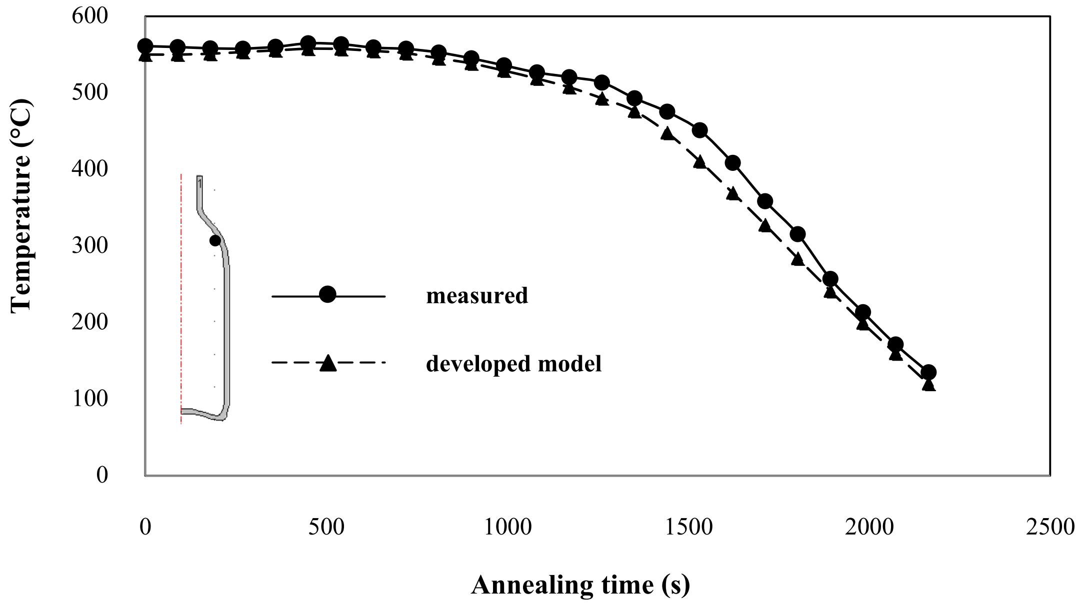
รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.7 – 6.12 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นตำแหน่งผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงโดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จริงในหน่วย °C ณ ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.47 %, 3.11 % และ 3.14 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านนอกรวมเท่ากับ 3.24 %ส่วนอุณหภูมิผิวด้านในที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.47 %, 3.17 % และ 3.11 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านในรวมเท่ากับ 3.25 %

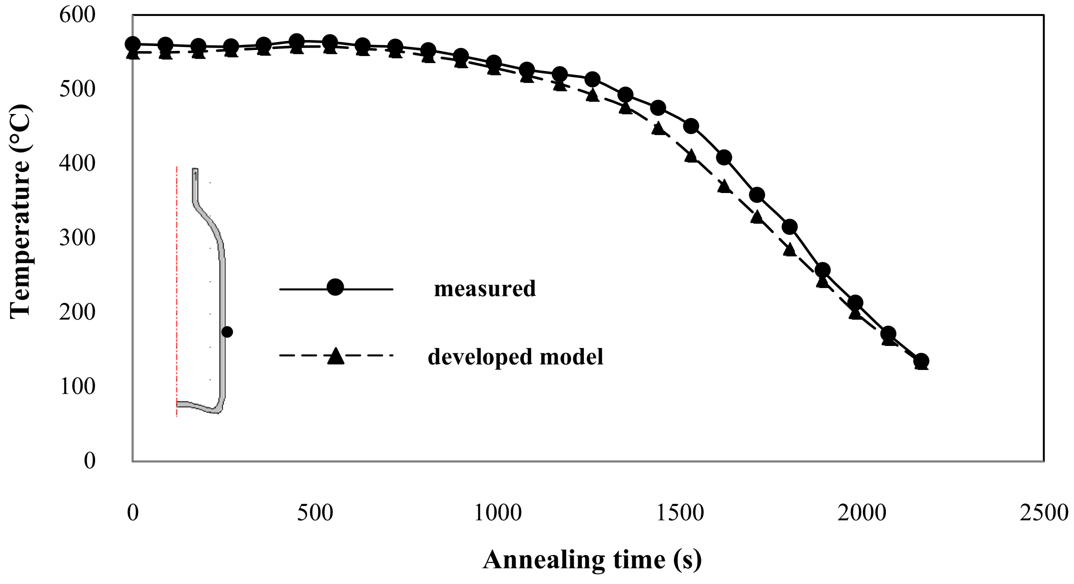
6.1.2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



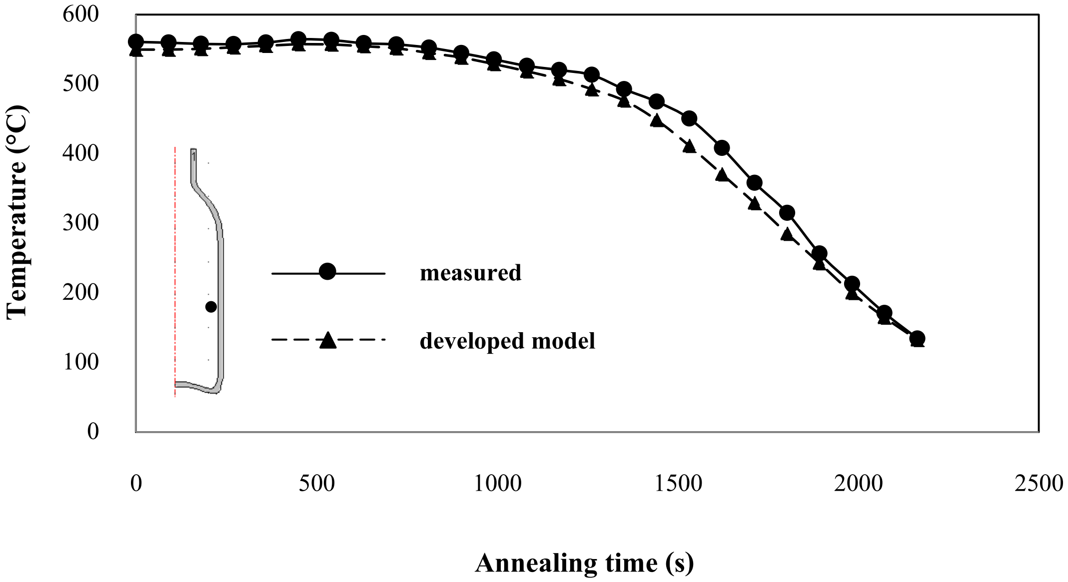
รูปที่ 6.13 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



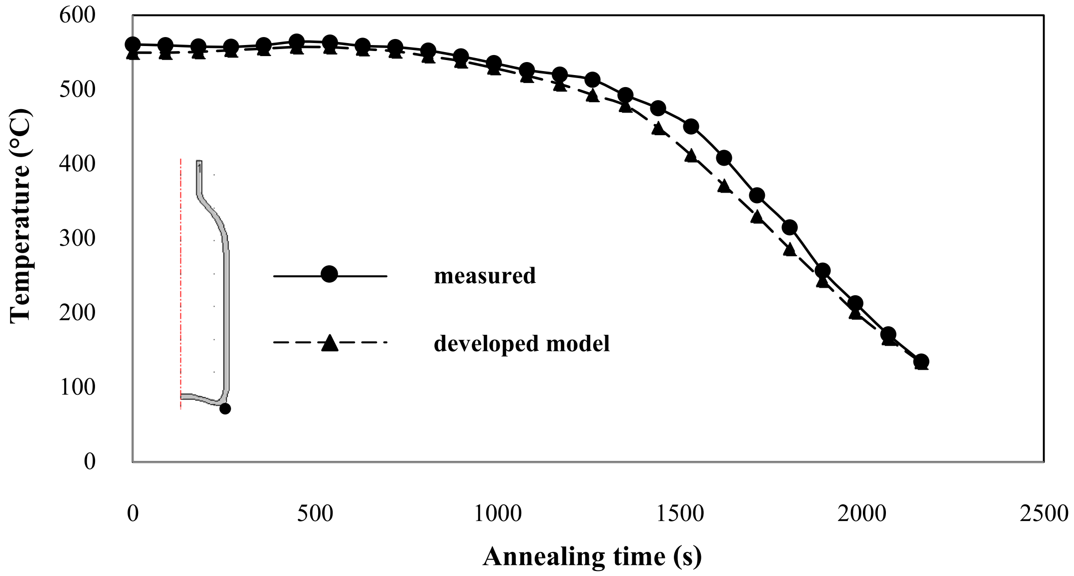
รูปที่ 6.14 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



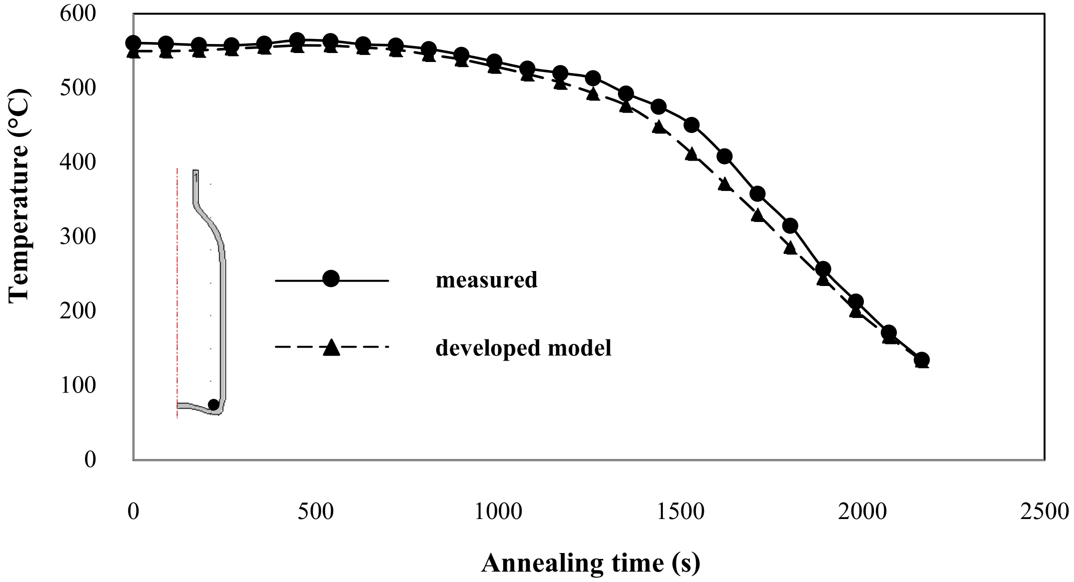
รูปที่ 6.15 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



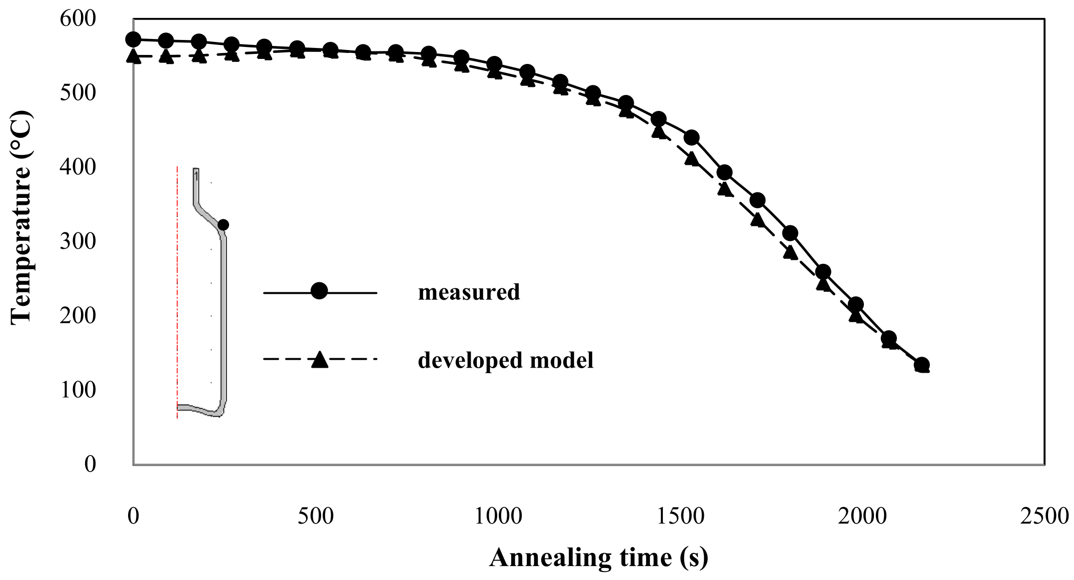
รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



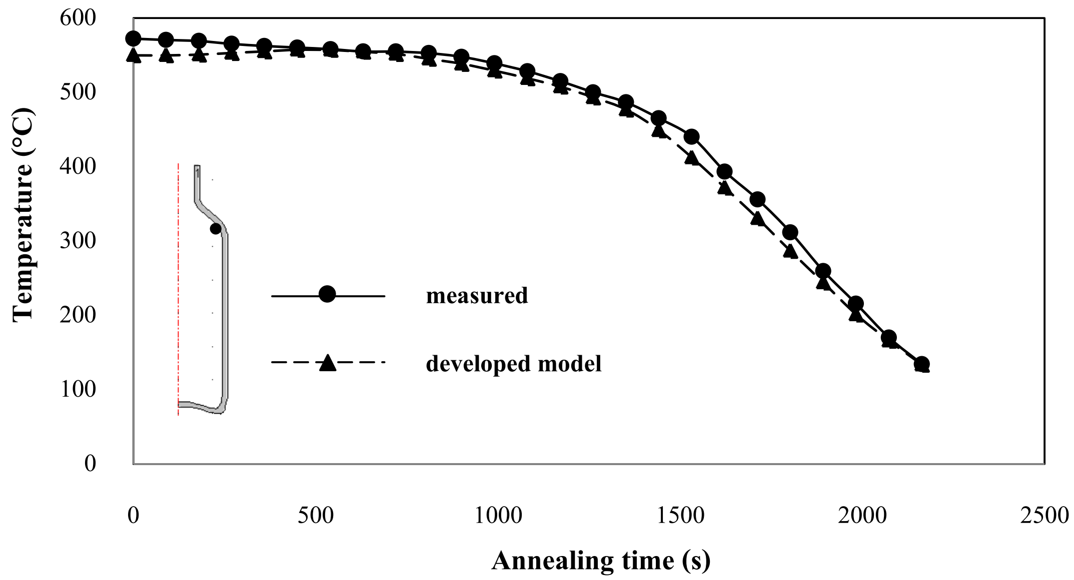
รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.13 – 6.18 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นตำแหน่งผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงโดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จริงในหน่วย °C ณ ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.32 %, 3.41 % และ 3.27 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านนอกรวมเท่ากับ 3.33 % ส่วนอุณหภูมิผิวด้านในที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.33 %, 3.40 % และ 3.27 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านในรวมเท่ากับ 3.33 %

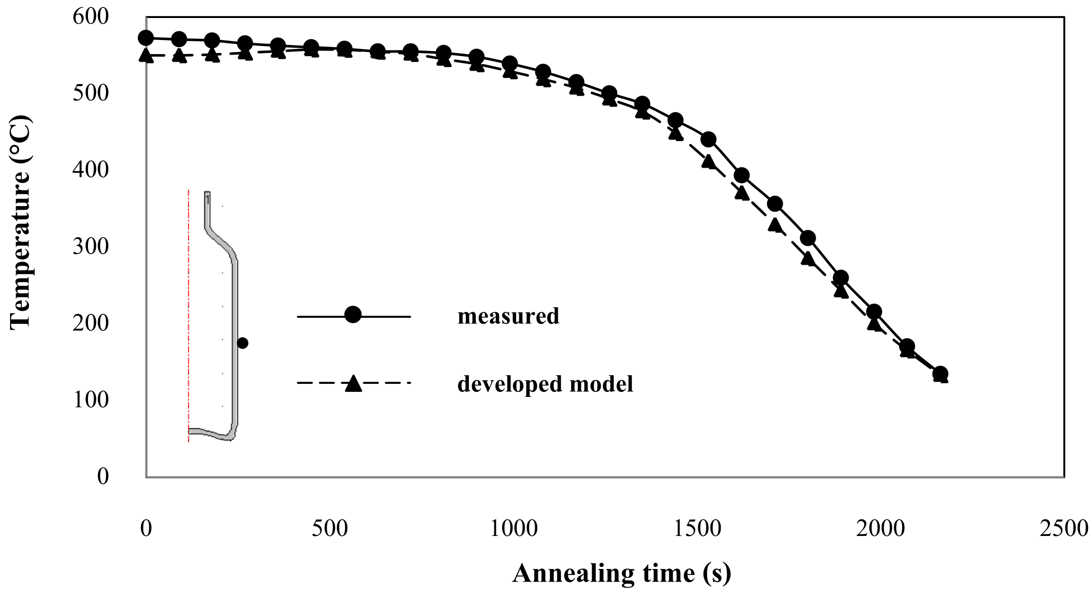
6.1.2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



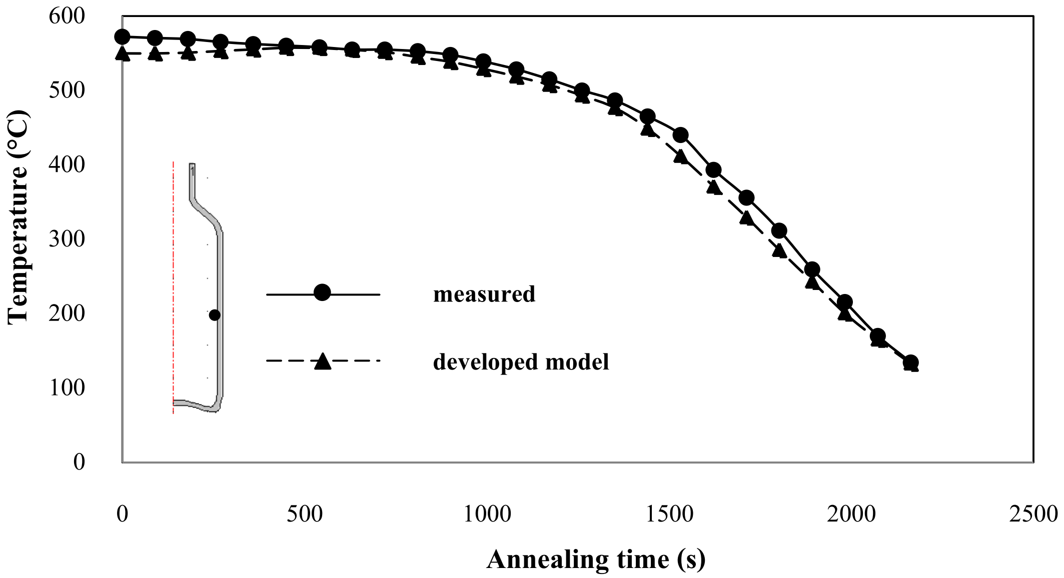
รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



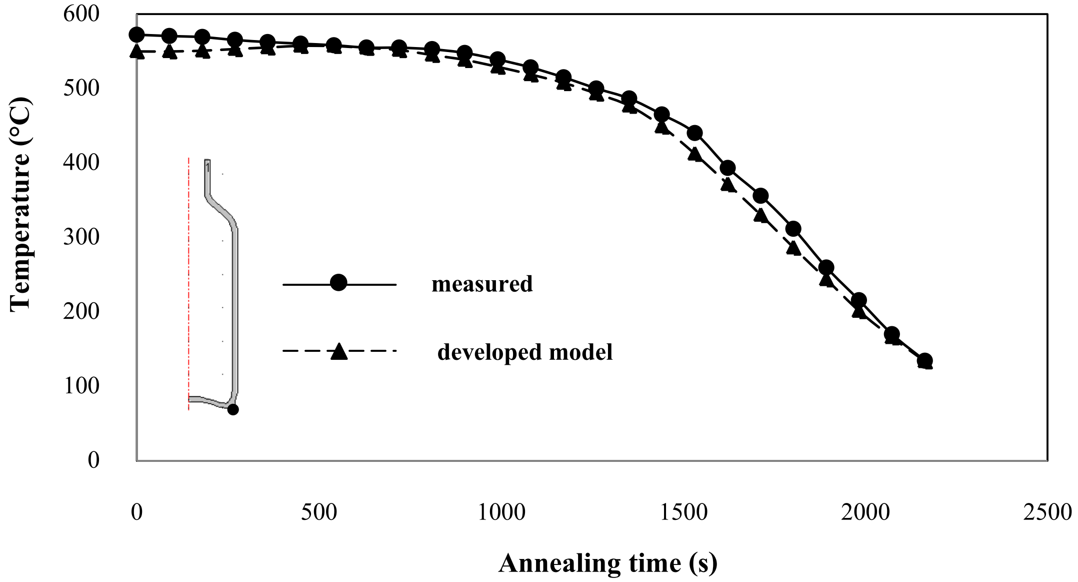
รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



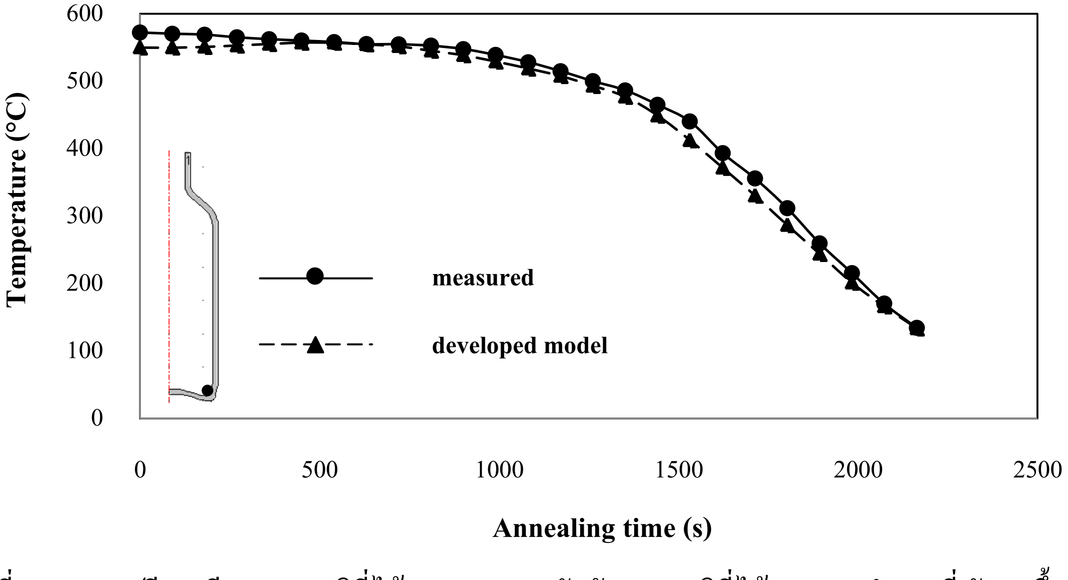
รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.19 – 6.24 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นตำแหน่งผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริงโดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จริงในหน่วย °C ณ ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.02 %, 3.18 % และ 3.06 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านนอกรวมเท่ากับ 3.03 % ส่วนอุณหภูมิผิวด้านในที่ตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้น มีค่าเท่ากับ 3.03 %, 3.17 % และ 3.02 % ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิผิวด้านในรวมเท่ากับ 2.07 %

6.2 การออกแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้ว

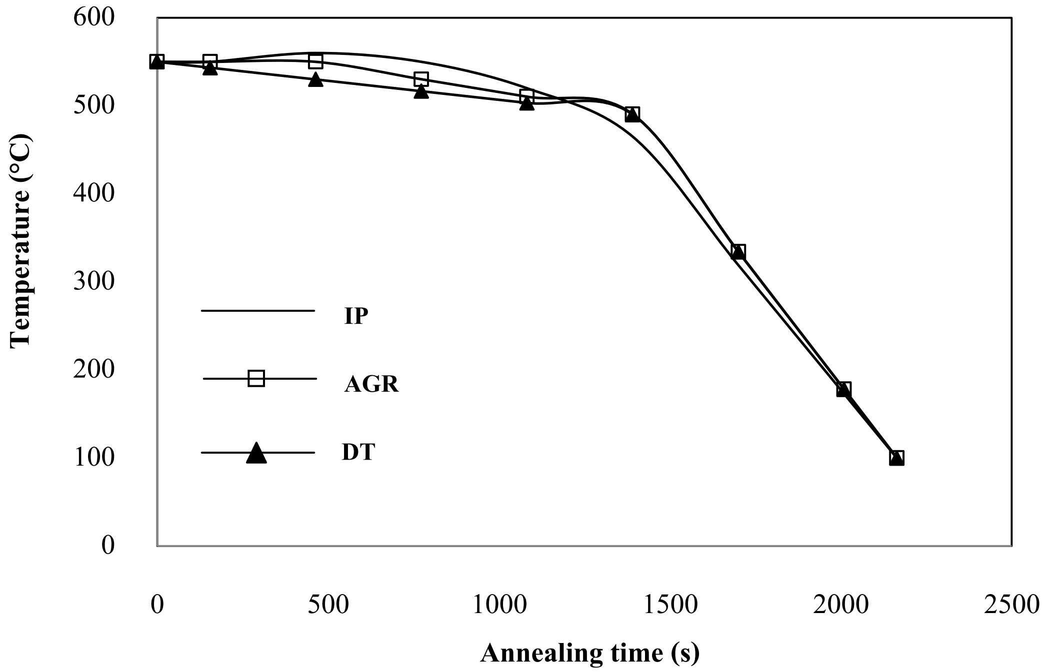
ในการทำนายผลการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสที่ความหนา 3 มม. จากแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง (IP) แบบอุณหภูมิอ้างอิงจาก American Glass Research, Inc. (ARG) และแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น (DT) โดยทำนายผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจากสมการ 4.2 และ 4.9 และโปรแกรม Comsol Multiphysics

1. แบบอุณหภูมิที่ศึกษาในกระบวนการอบอ่อน
- แบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการจริง(In Process : IP)
- แบบอุณหภูมิของสถาบันวิจัยแก้ว(American Glass Research, Inc. : AGR)
- แบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้น (Developed Temperature : DT)
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว
- แบบจำลองอุณหภูมิทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว

$$\rho Cp\frac{\partial T_g}{\partial t}+\rho Cp(u_r\frac{\partial T_g}{\partial r}+u_z\frac{\partial T_g}{\partial z}) = (\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(k_r r\frac{\partial T_g}{\partial r})+ \frac{\partial}{\partial z}(k_z\frac{\partial T_g}{\partial z}))$$

- แบบจำลองความเค้นทางคณิตศาสตร์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว

$$\rho(\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}) - (\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r) + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}) = 0$$

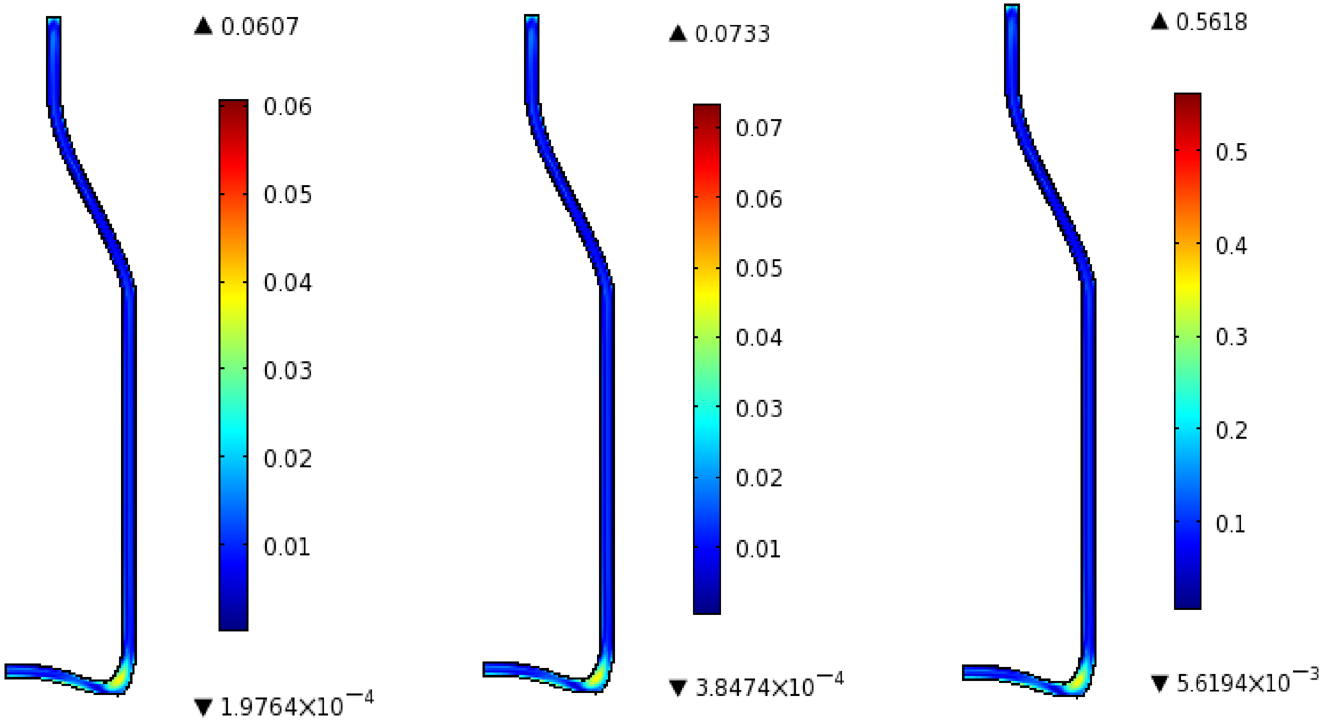


รูปที่ 6.25 แบบอุณหภูมิที่ศึกษาในกระบวนการอบอ่อนบรรจุภัณฑ์แก้ว

6.2.1 ผลการทำนายการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้ว

ในการทำนายการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสที่ความหนา 3 มม. จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT, AGR และ IP จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยแถบสีต่าง ๆ จะแสดงถึงความเค้น (MPa) ของบรรจุภัณฑ์แก้ว แกน X คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายและภายนอก แกน Y คือ ความสูงของบรรจุภัณฑ์แก้วซึ่งผลการทำนายความเค้น ณ เวลาต่าง ๆ มีดังนี้

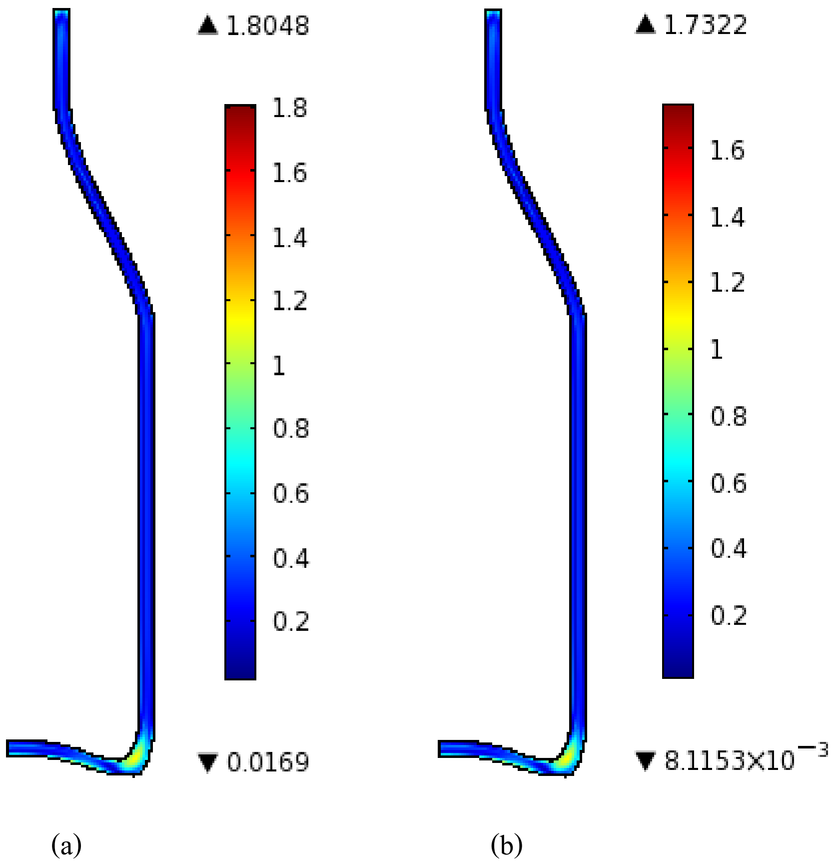
6.2.1.1 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



(a) (b) (c)

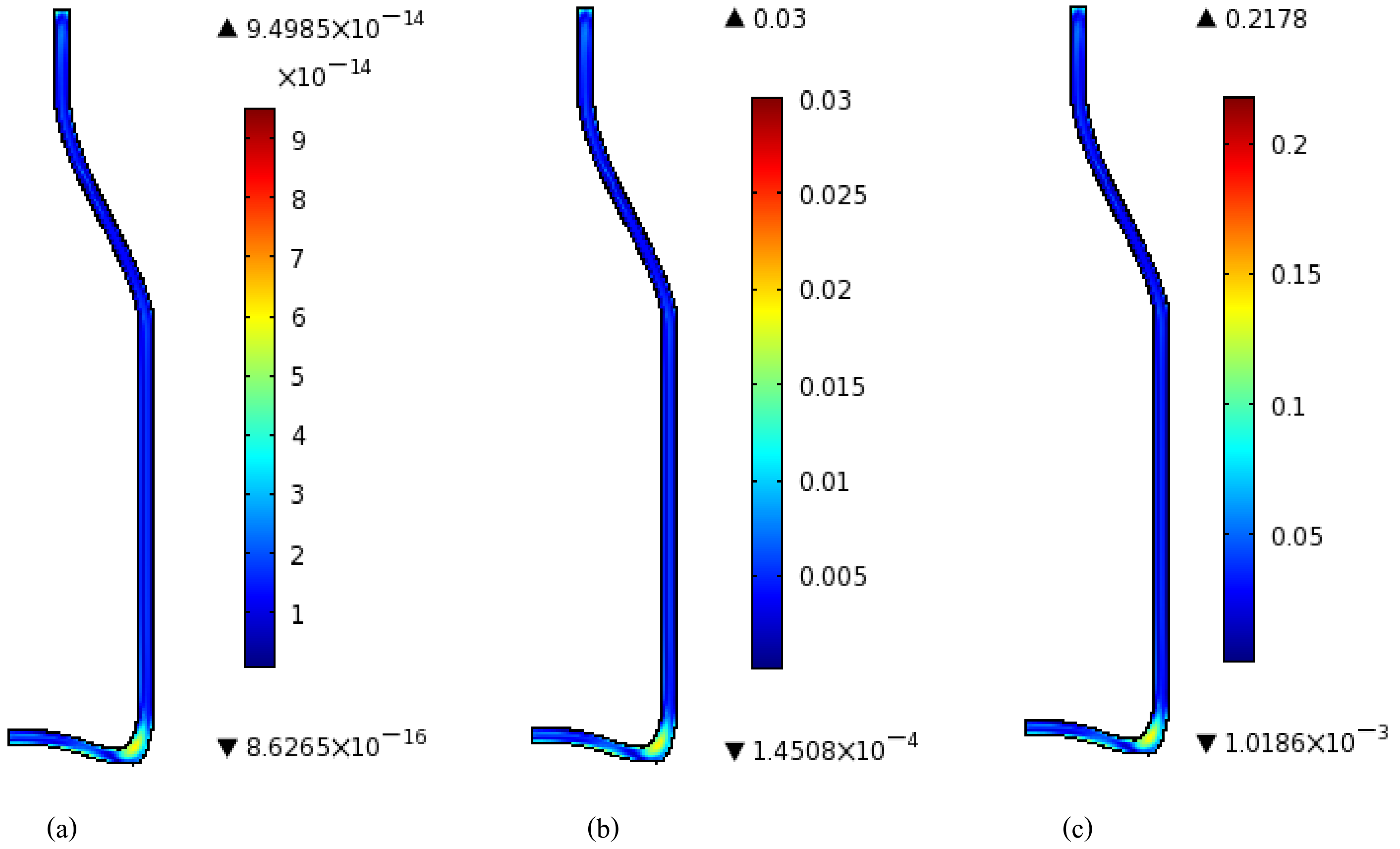
รูปที่ 6.26 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.1 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



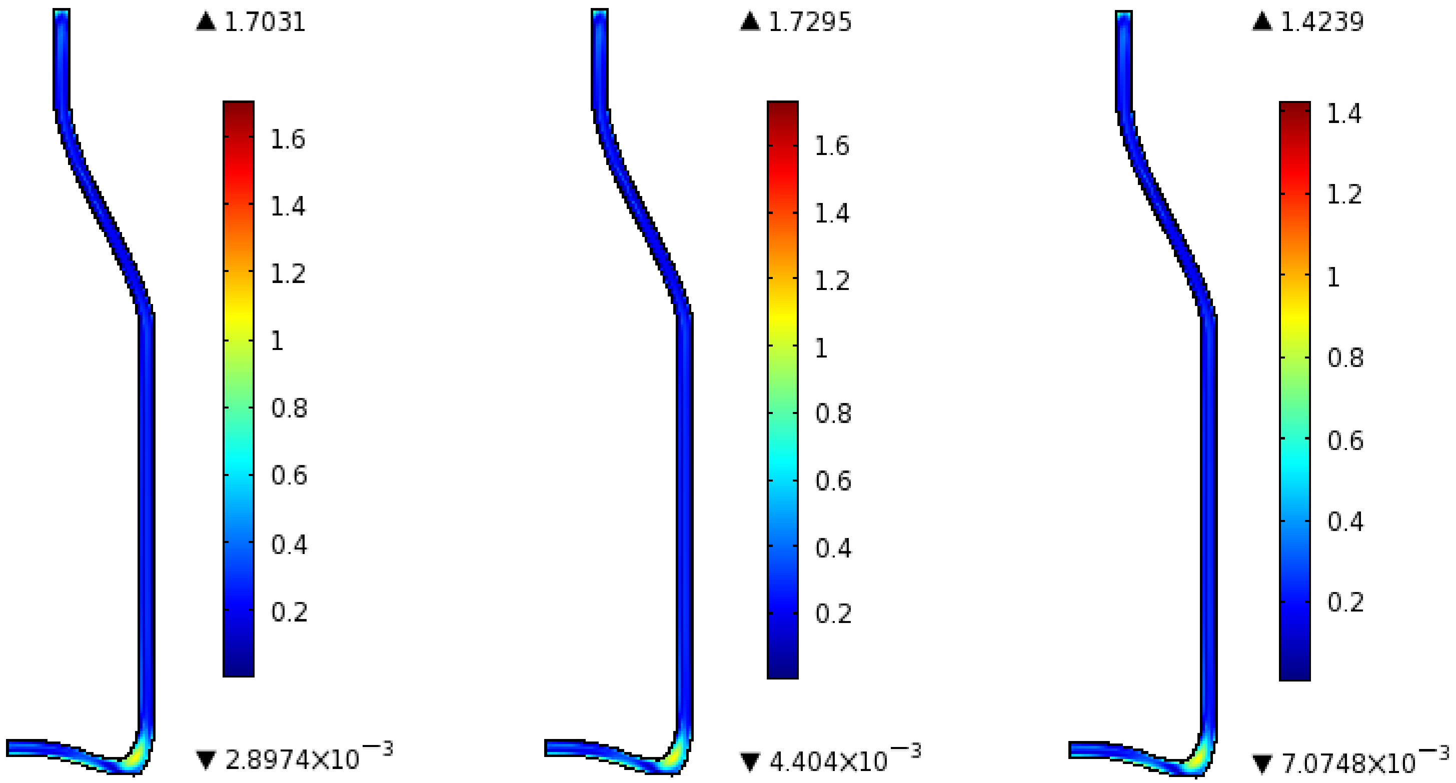
รูปที่ 6.27 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.2 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



รูปที่ 6.28 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

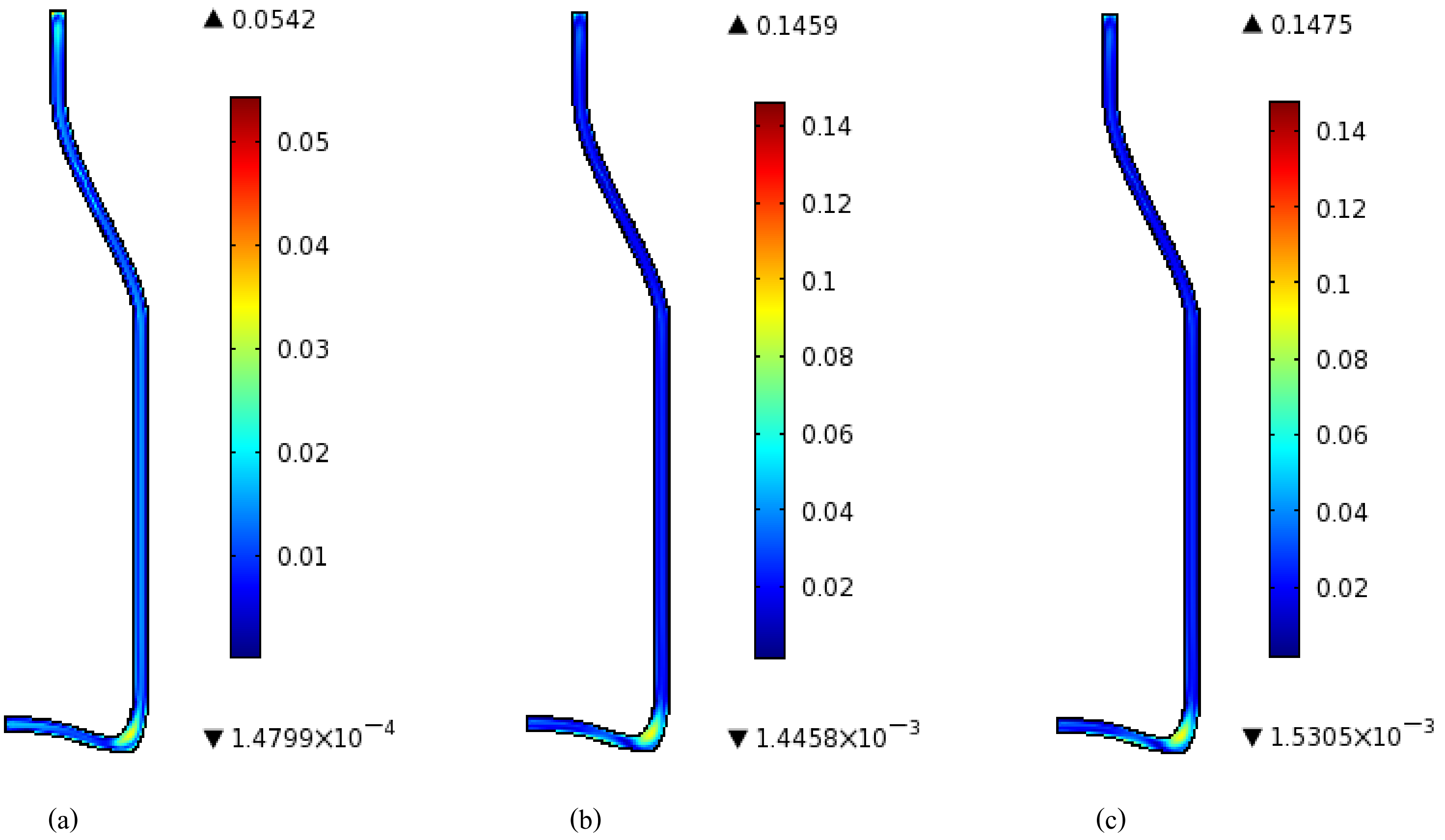
6.2.1.2 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



(a) (b) (c)

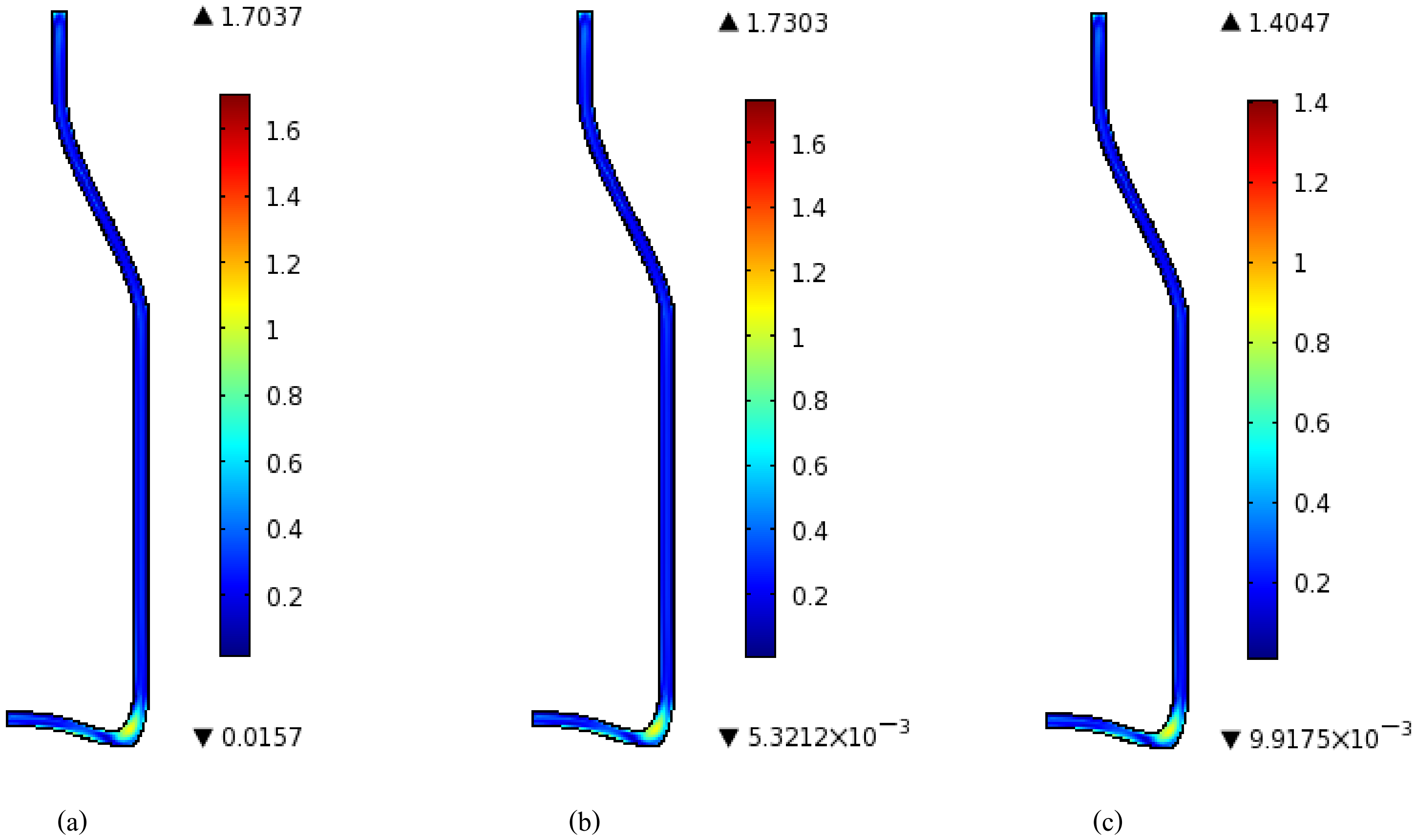
รูปที่ 6.29 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน AGRในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.3 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT



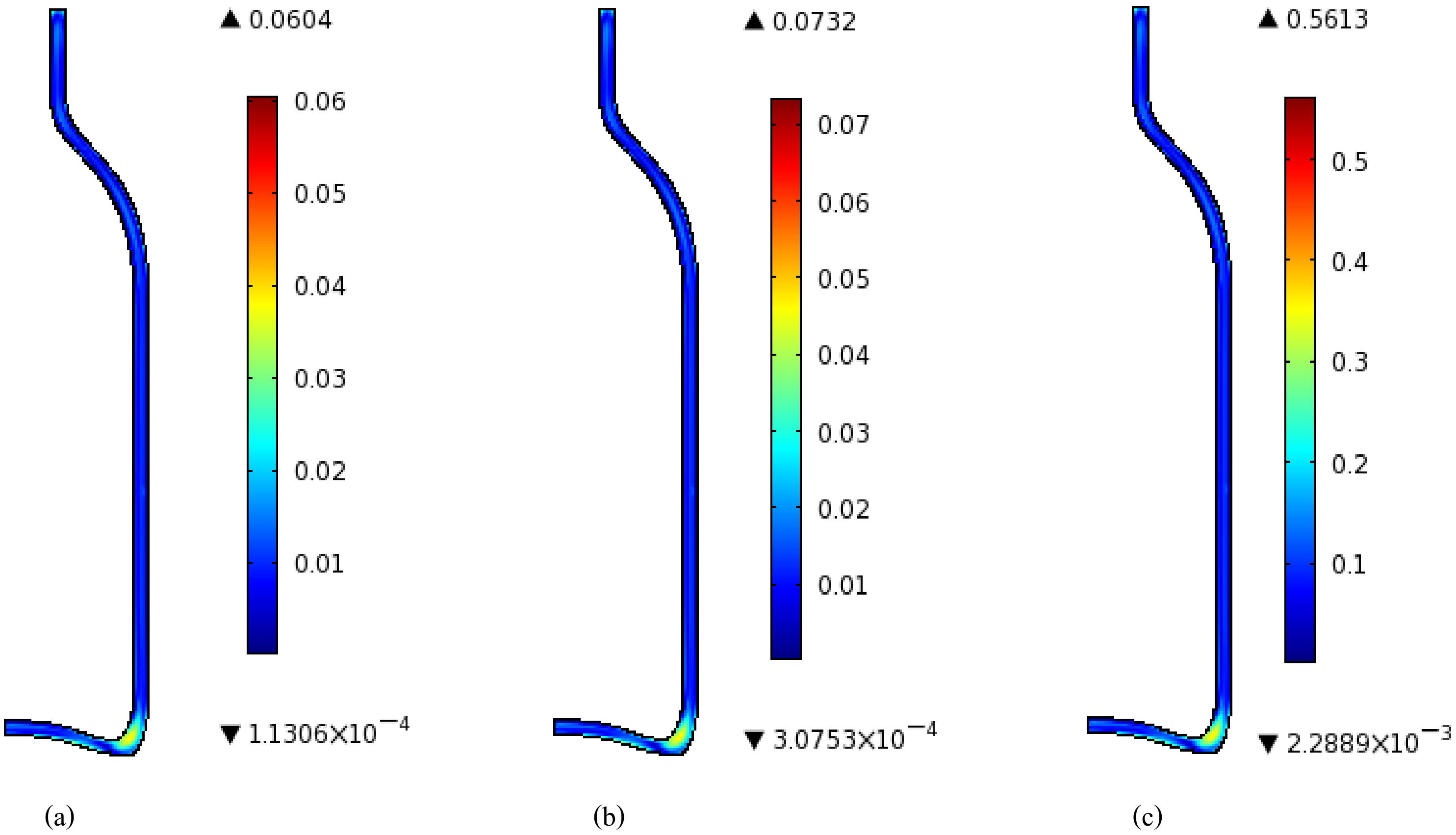
รูปที่ 6.30 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.3 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT



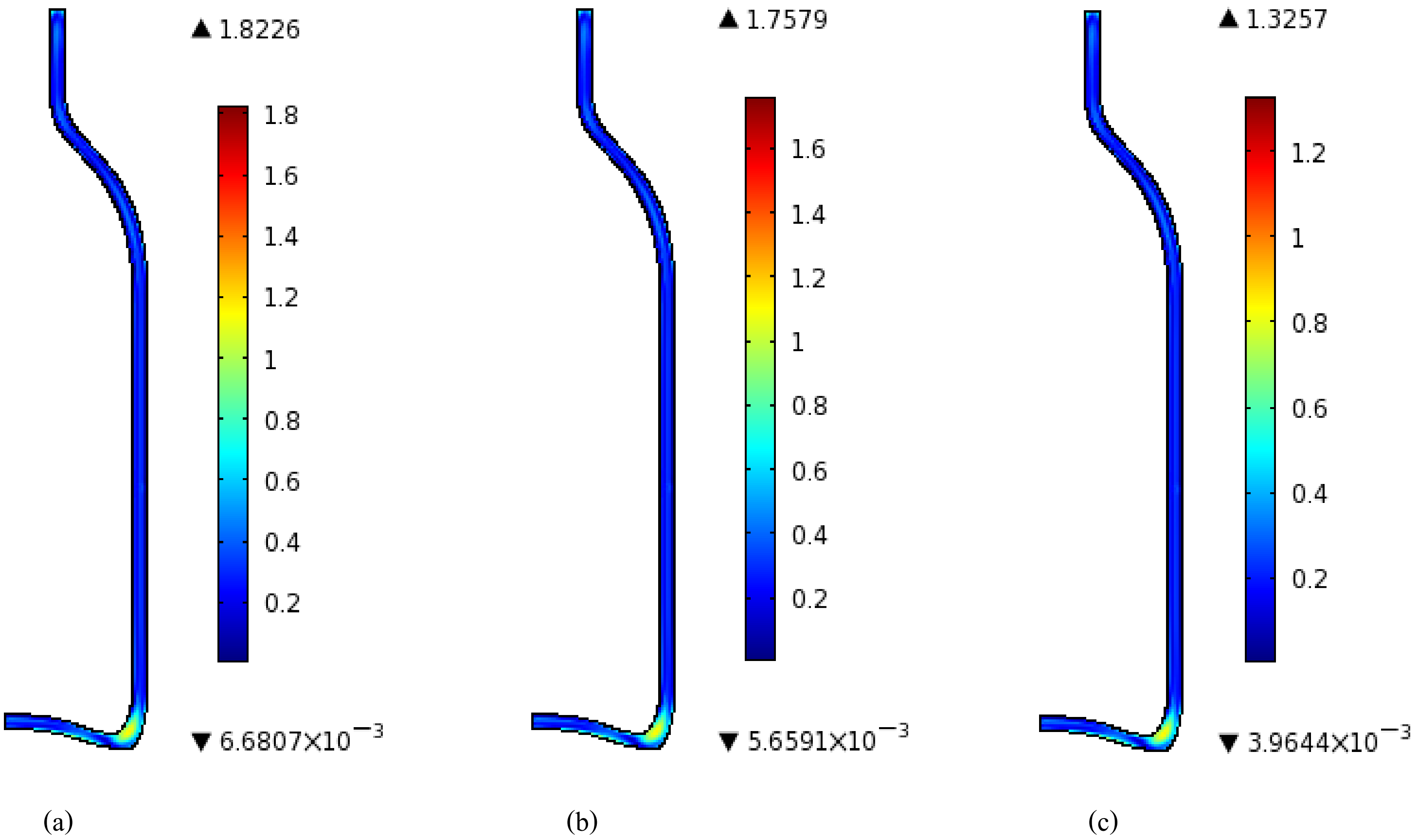
รูปที่ 6.31 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aจากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.4 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



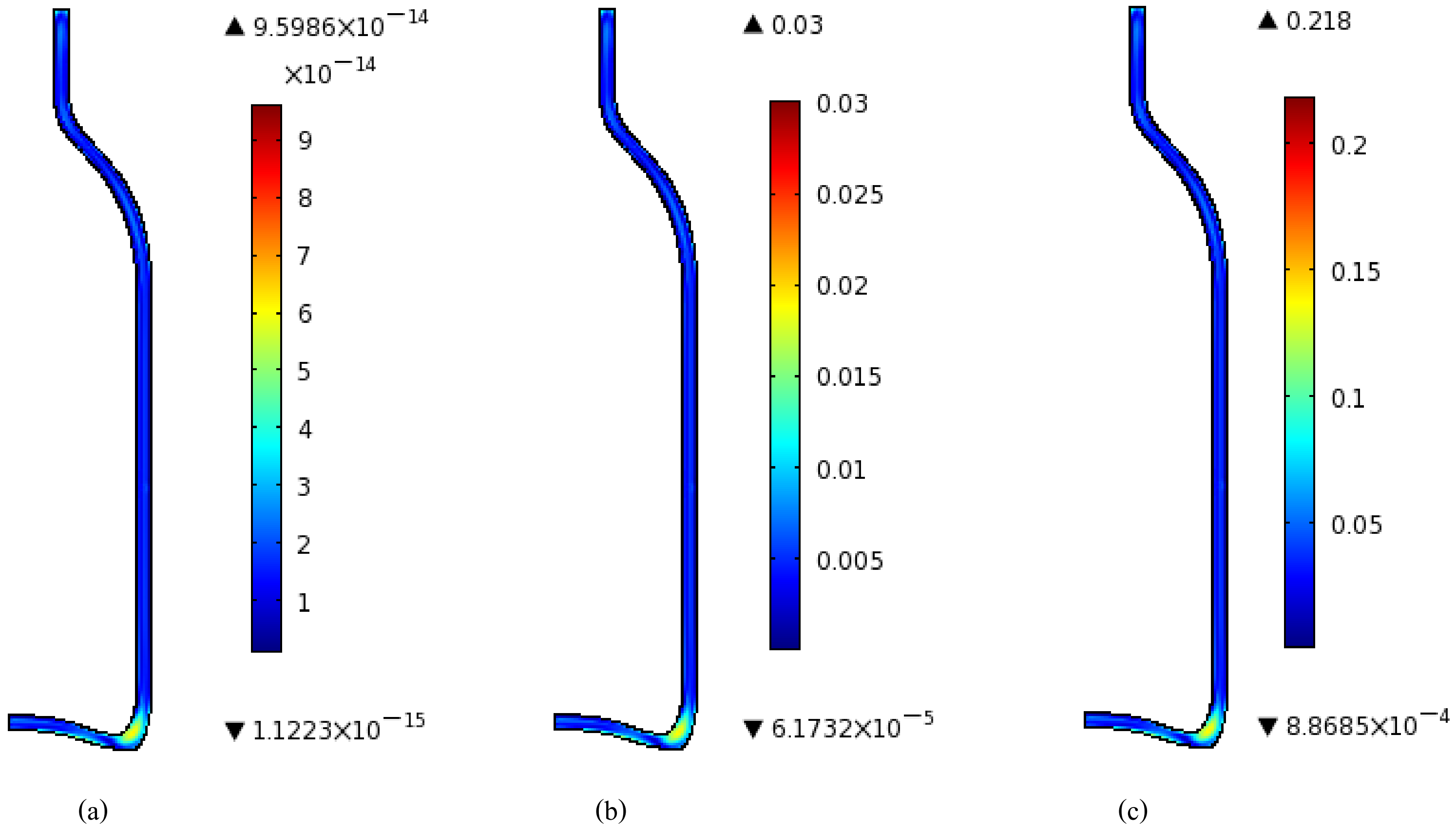
รูปที่ 6.32 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.4 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



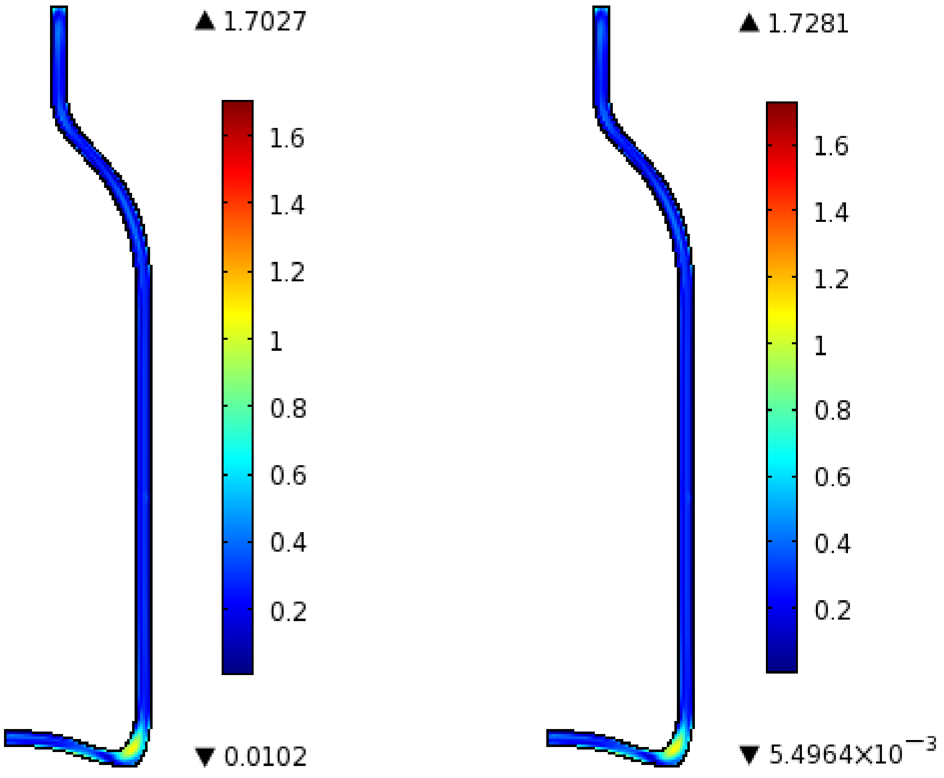
รูปที่ 6.33 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.5 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



รูปที่ 6.34 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

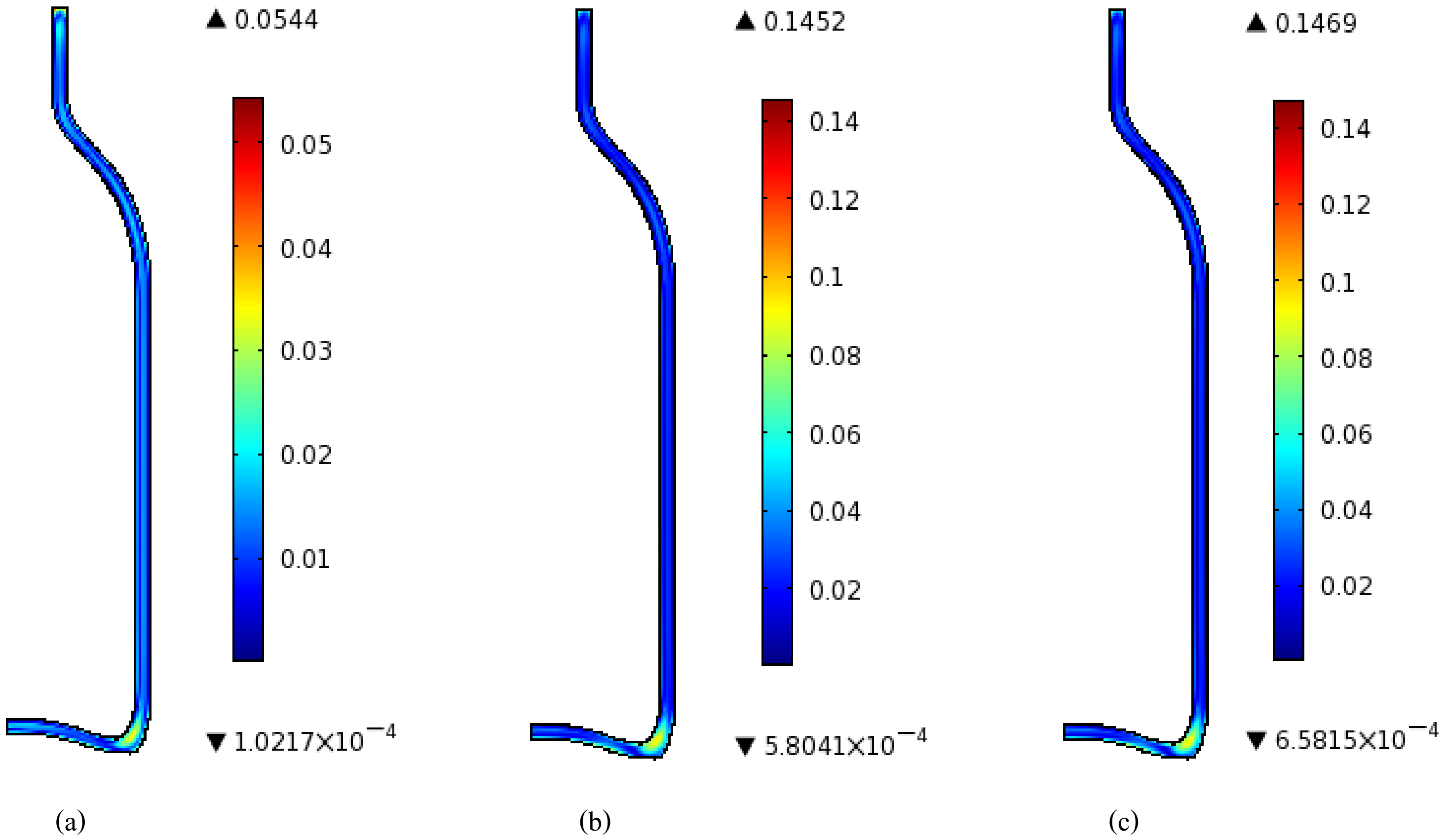
6.2.1.5 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



(a) (b) (c)

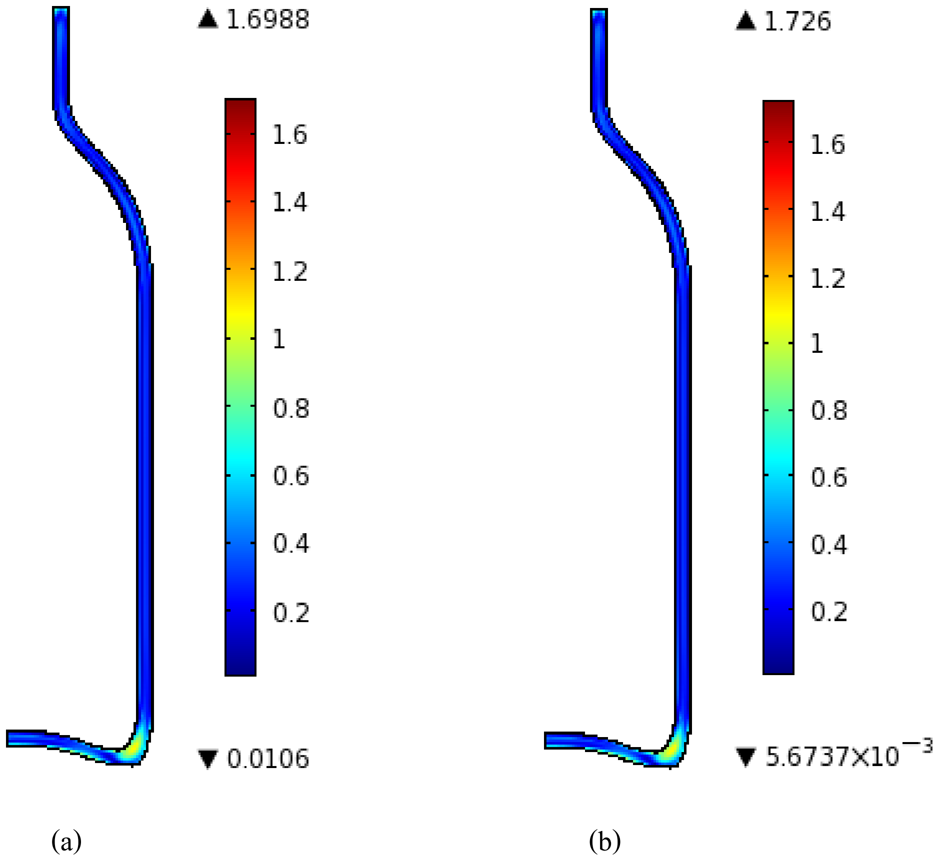
รูปที่ 6.35 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.6 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT



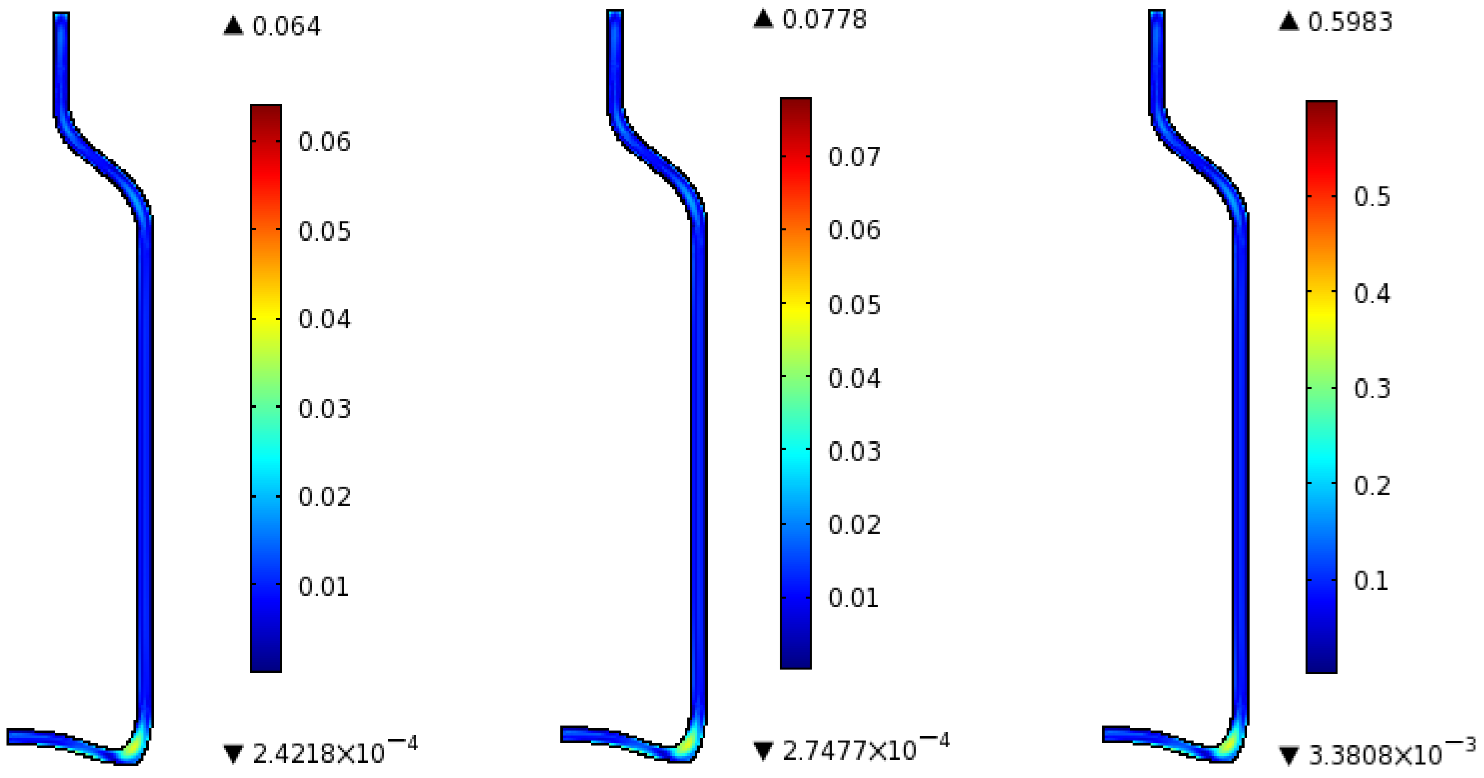
รูปที่ 6.36 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.6 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT



รูปที่ 6.37 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

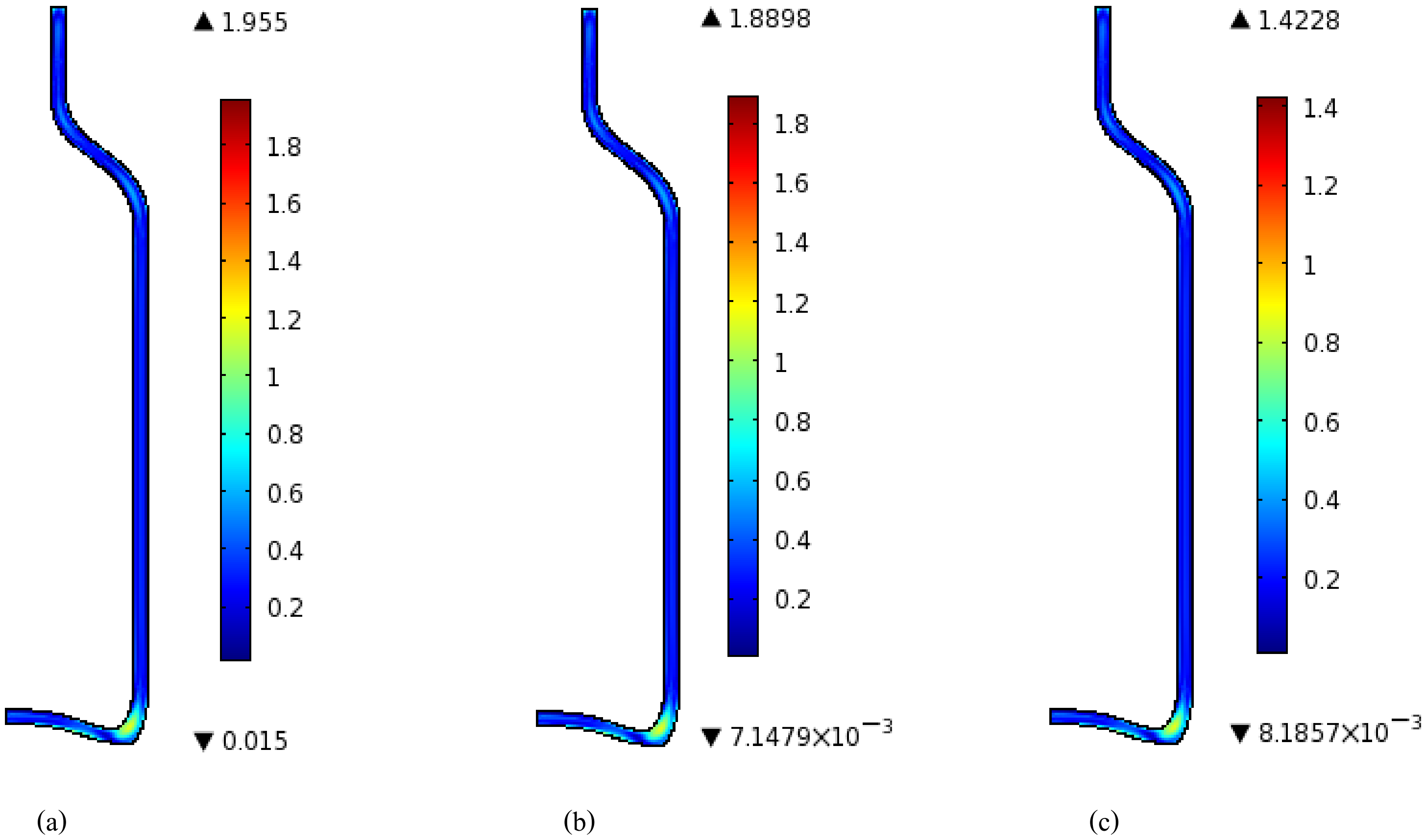
6.2.1.7 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



(a) (b) (c)

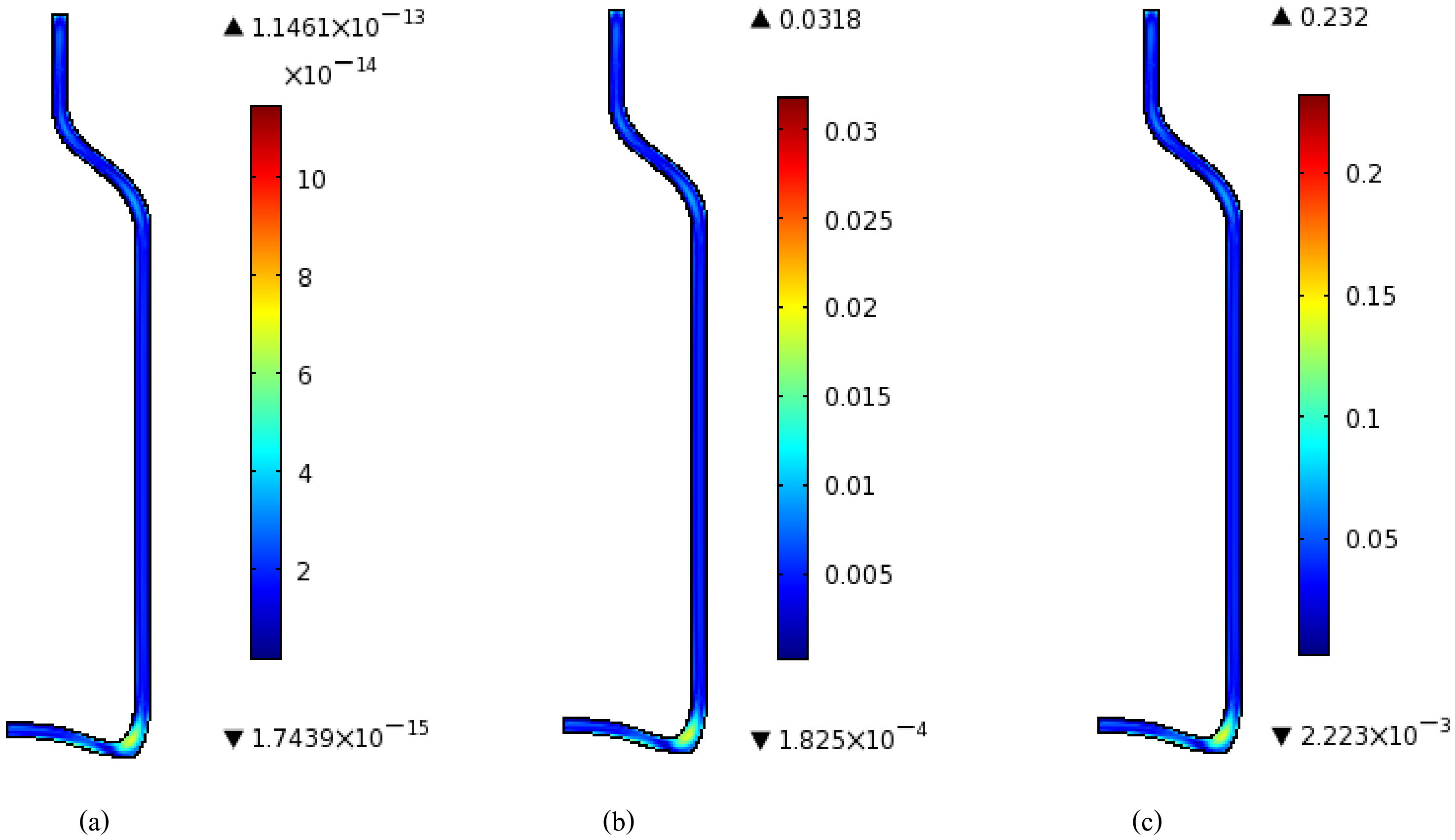
รูปที่ 6.38 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.7 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP



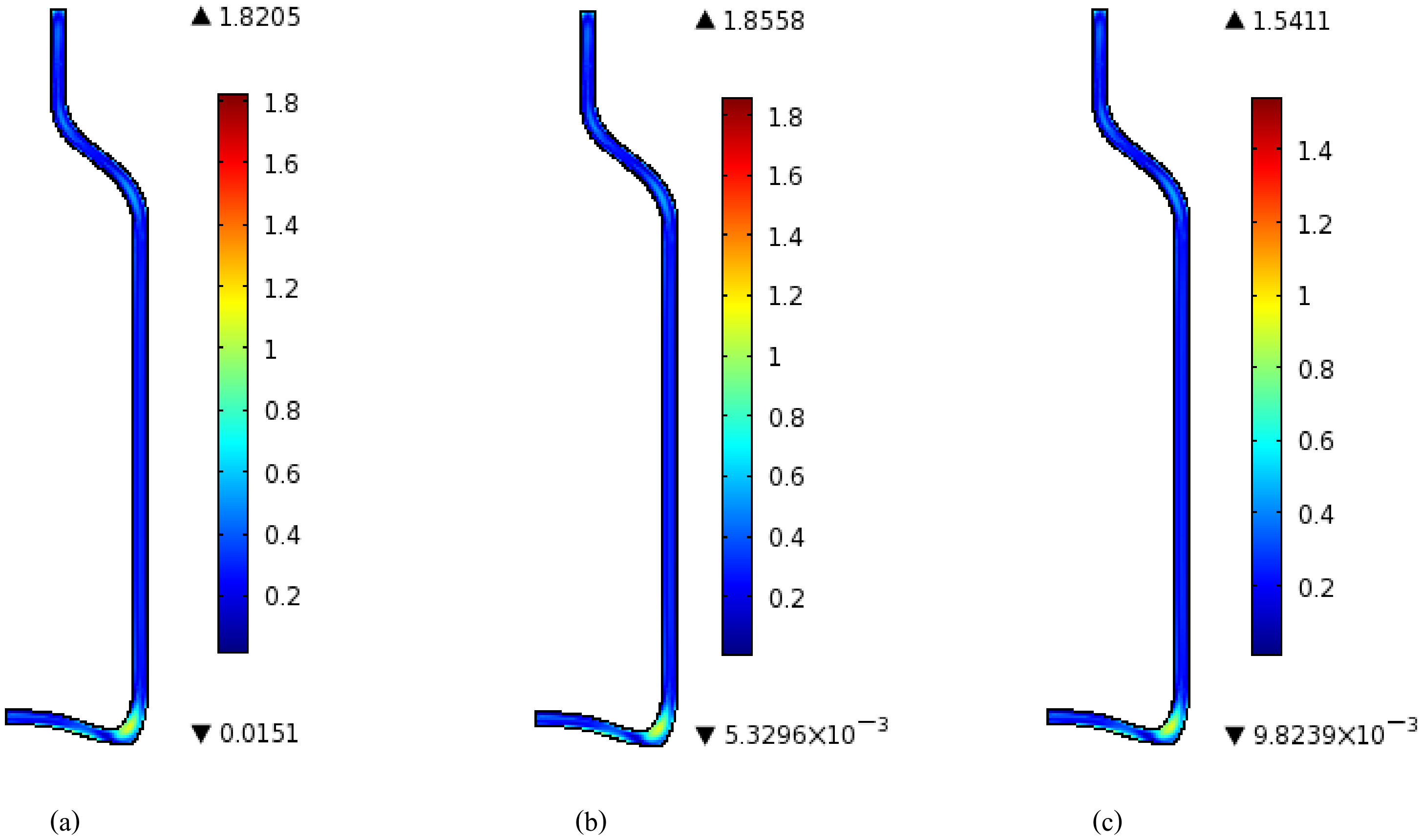
รูปที่ 6.39 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน IP ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

6.2.1.8 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



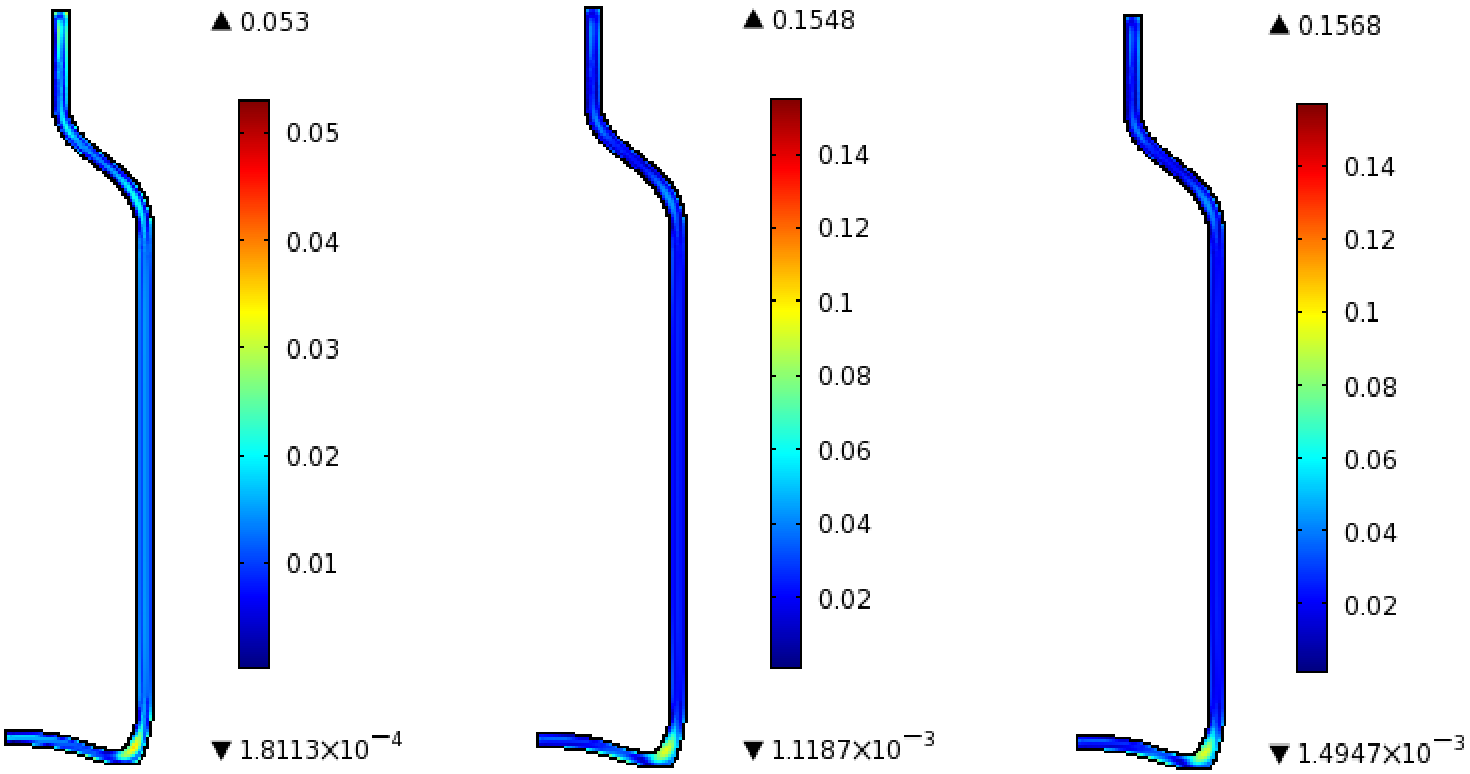
รูปที่ 6.40 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.8 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR



รูปที่ 6.41 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Cจากอุณหภูมิอบอ่อน AGR ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

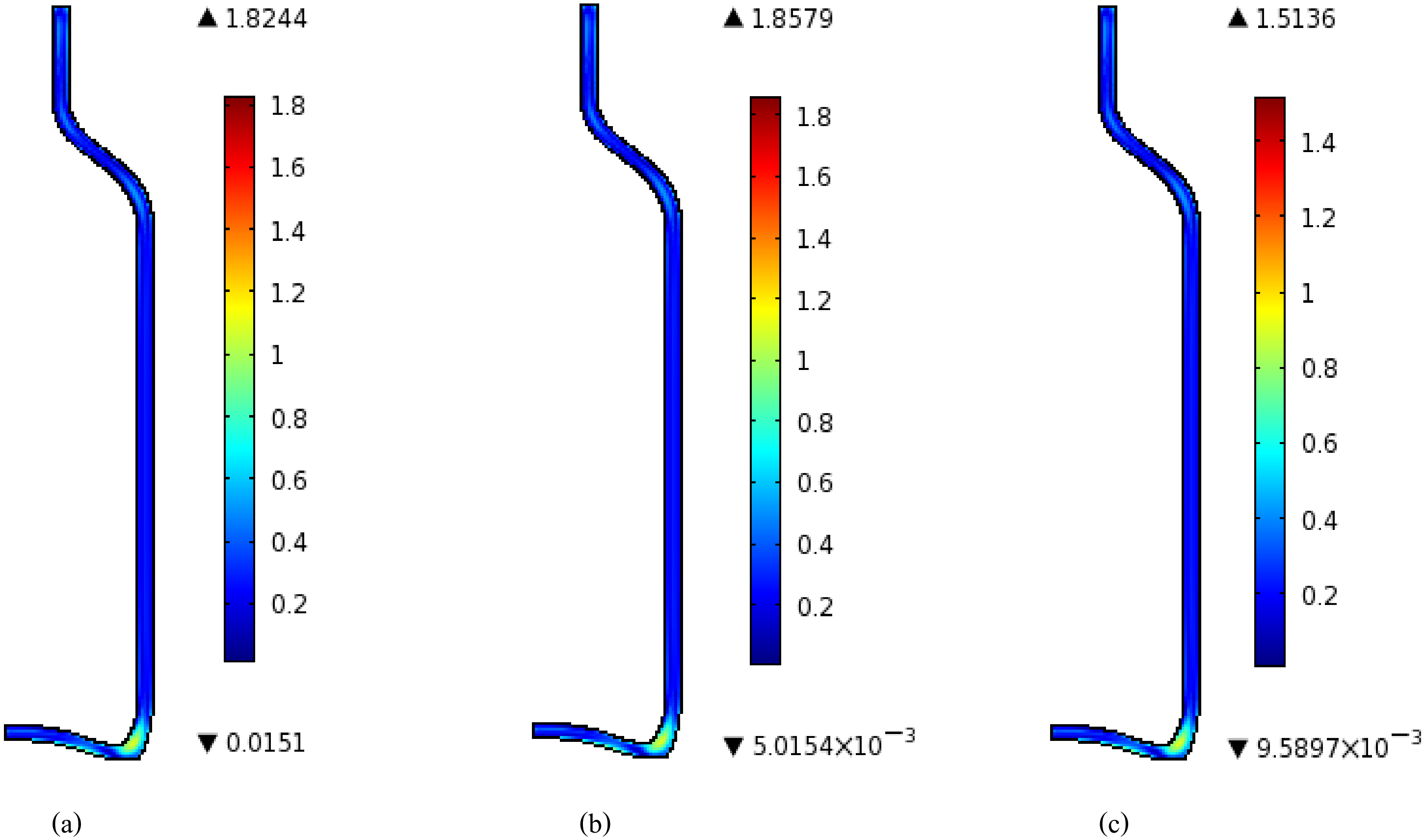
6.2.1.9 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT



(a) (b) (c)

รูปที่ 6.42 การกระจายตัวของความเค้นในบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Annealing Region ณ เวลา a) 250 วินาที b) 500 วินาที c) 1300 วินาที

6.2.1.9 ผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT

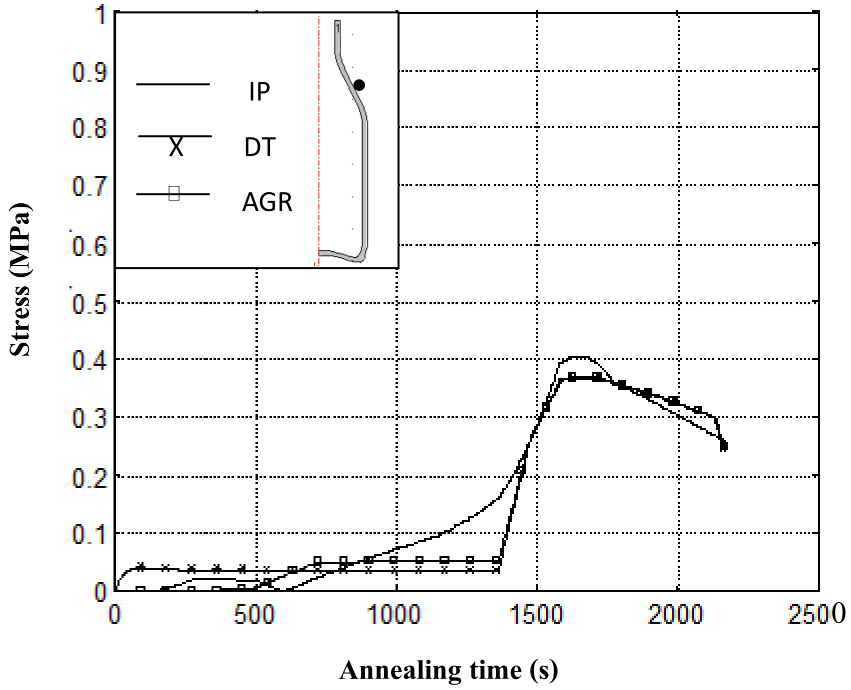


รูปที่ 6.43 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C จากอุณหภูมิอบอ่อน DT ในช่วง Cooling Region ณ เวลา a) 1700 วินาที b) 1900 วินาที c) 2164 วินาที

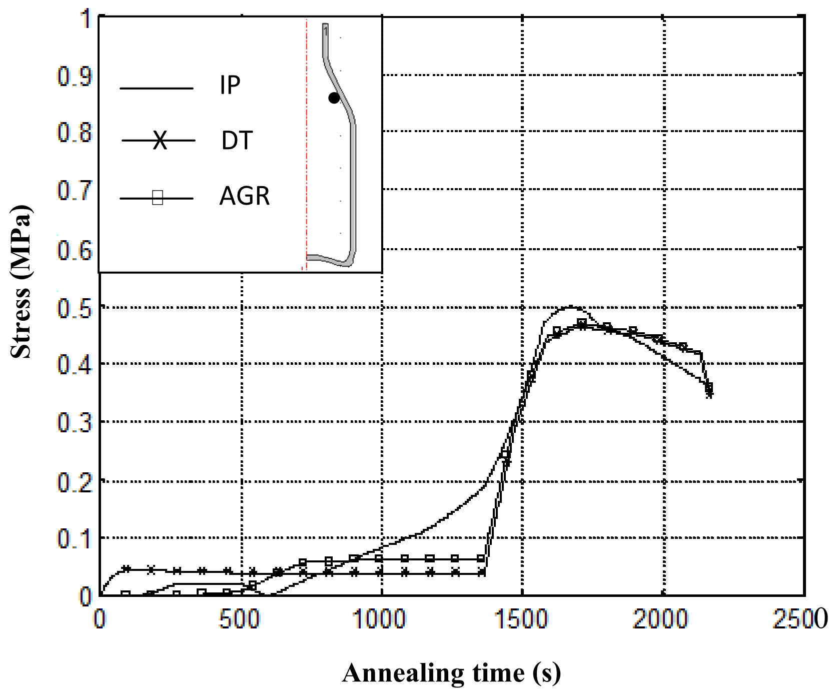
6.2.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้ว

ผลการทำนายการกระจายตัวของความเค้น ณ ตำแหน่งผิวด้านนอกและด้านในเมื่อแสดงผลในรูปแบบกราฟมีผลดังนี้

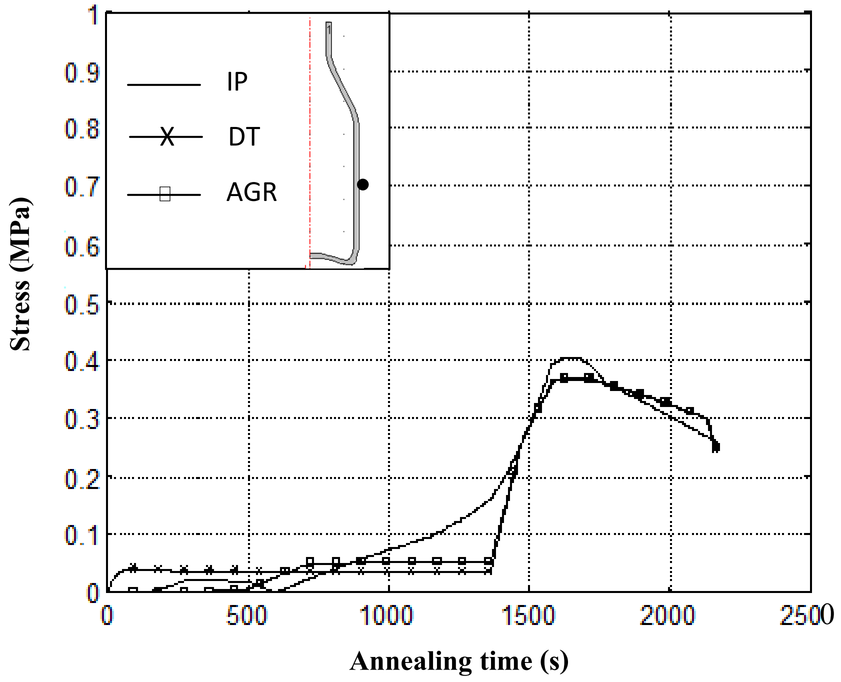
6.2.2.1 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



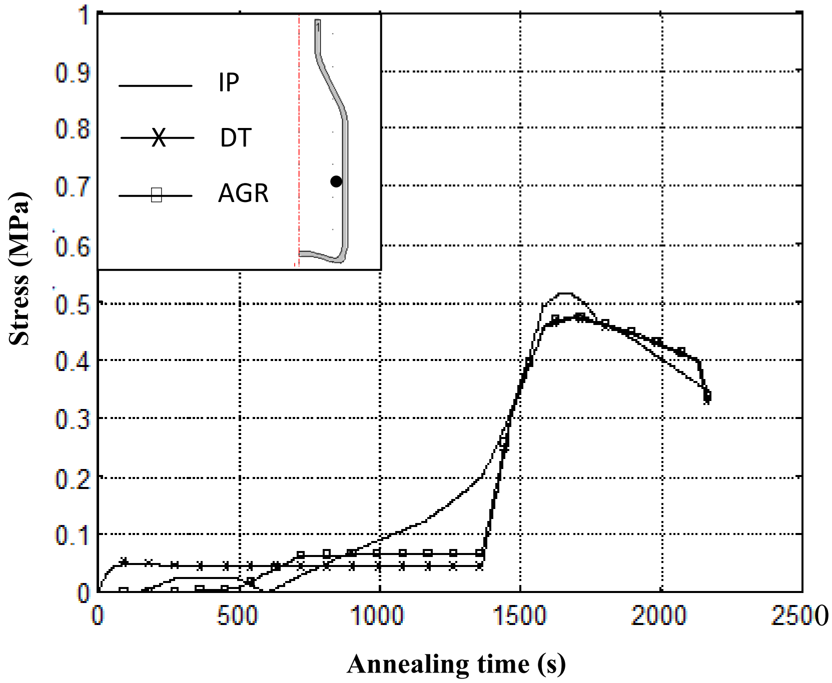
รูปที่ 6.44 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



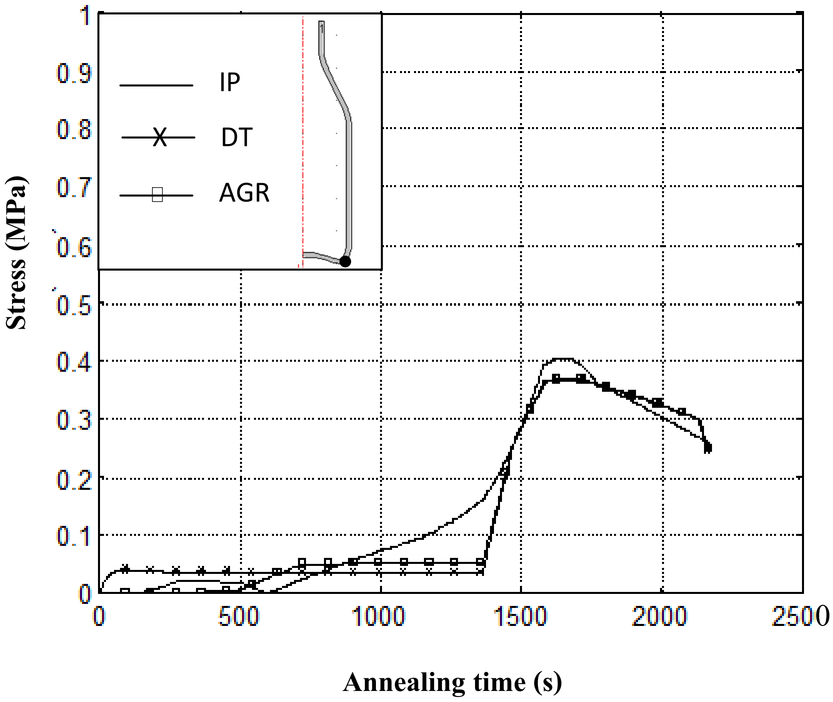
รูปที่ 6.45 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



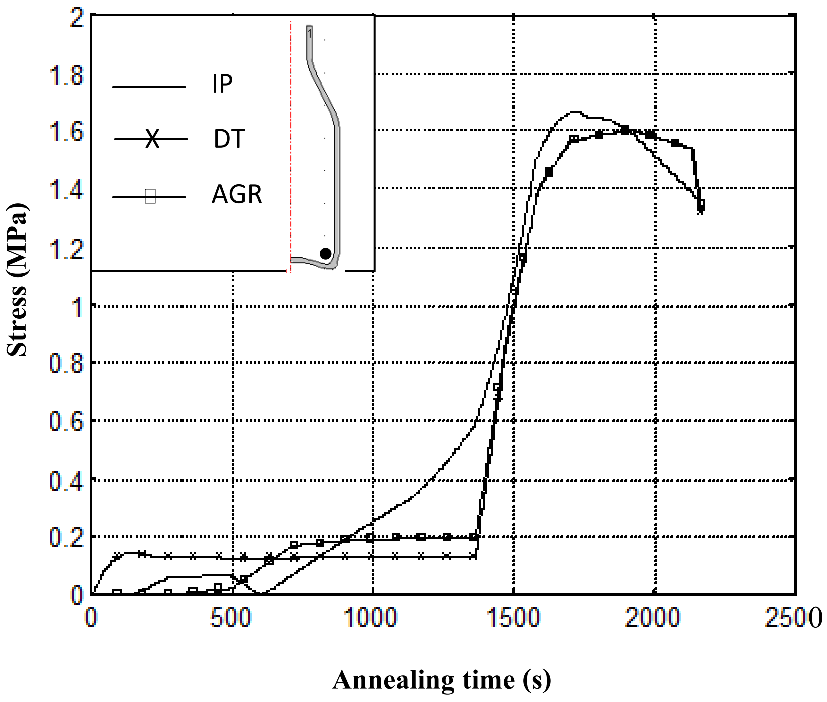
รูปที่ 6.46 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.47 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.48 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



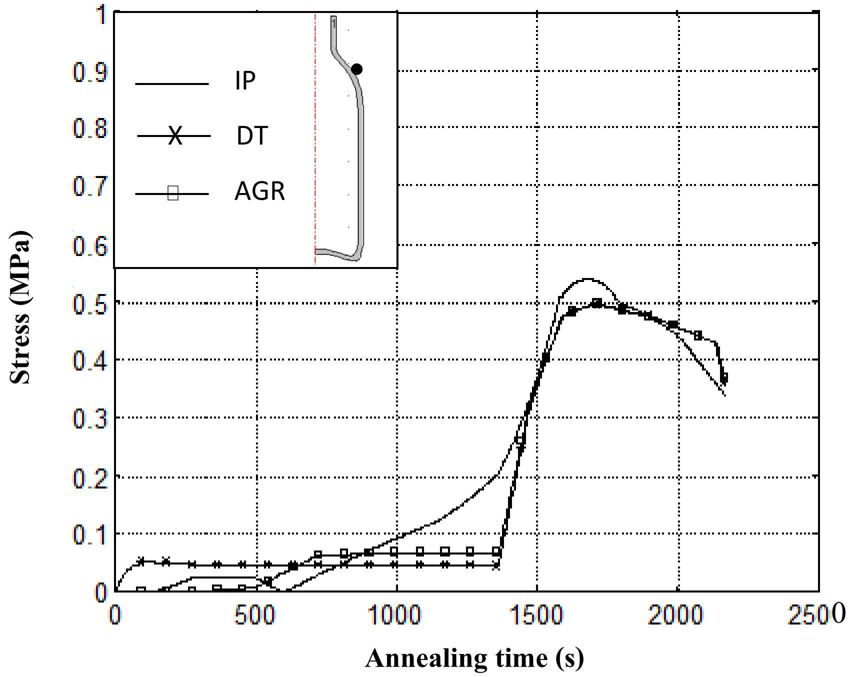
รูปที่ 6.49 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.44 – 6.49 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ Aในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อน ความเค้นจากแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับแบบอุณหภูมิ AGR และ IPโดยค่าทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ความเค้นที่ยอมรับได้ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.2

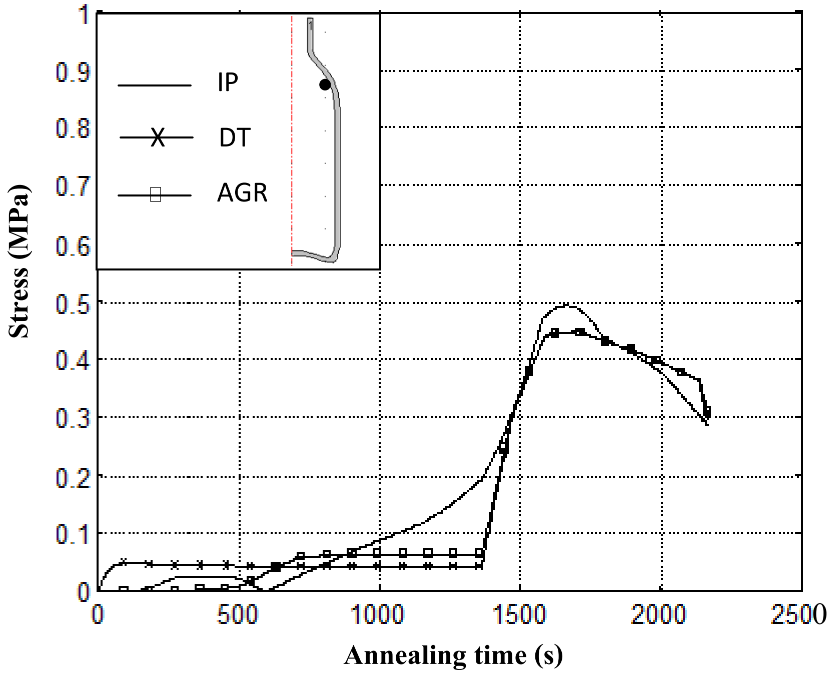
ตารางที่ 6.2 ผลการทำนายความเค้นผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

แบบอุณหภูมิอบอ่อน	**ผลการทำนายความเค้น (MPa)**						**ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)**
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**			
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ทุกตำแหน่ง**
IP	0.25	0.38	0.35	0.36	0.34	1.32	6
AGR	0.25	0.38	0.35	0.35	0.33	1.32	
DT	0.24	0.38	0.35	0.35	0.33	1.32	

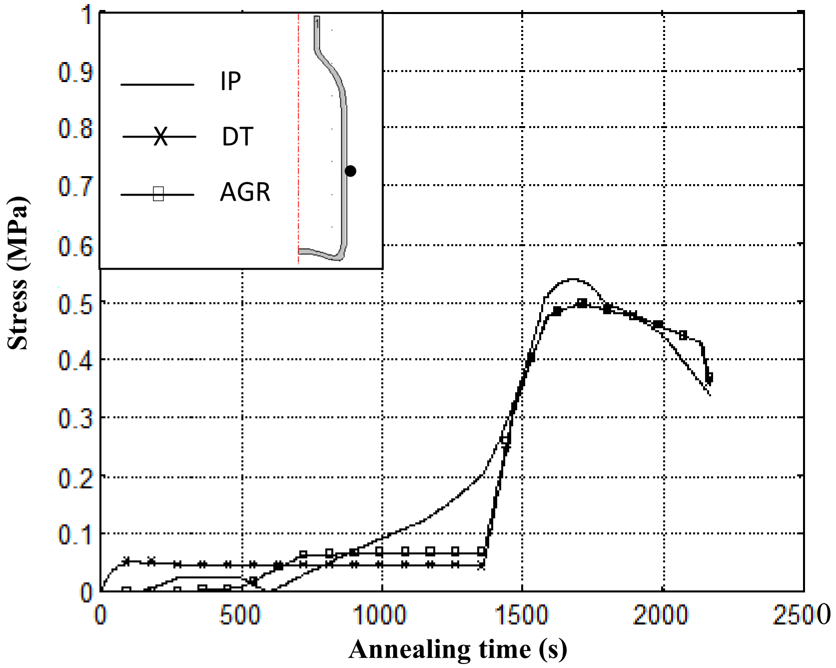
6.2.2.2 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



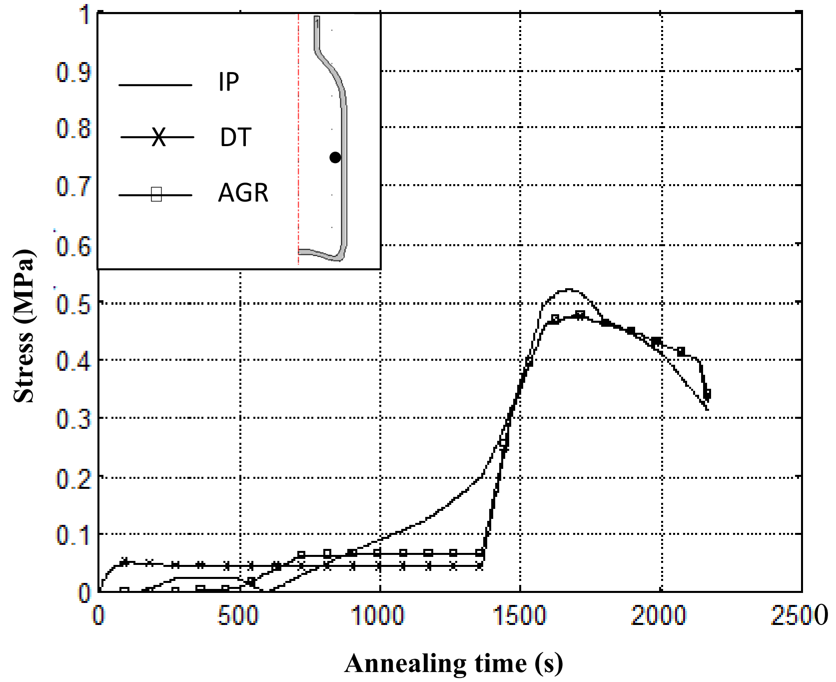
รูปที่ 6.50 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



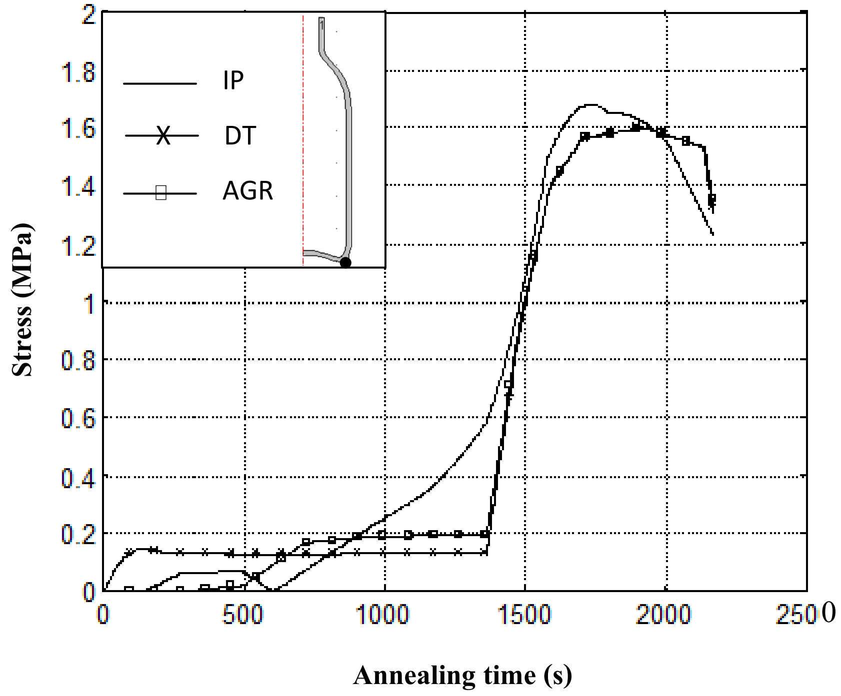
รูปที่ 6.51 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



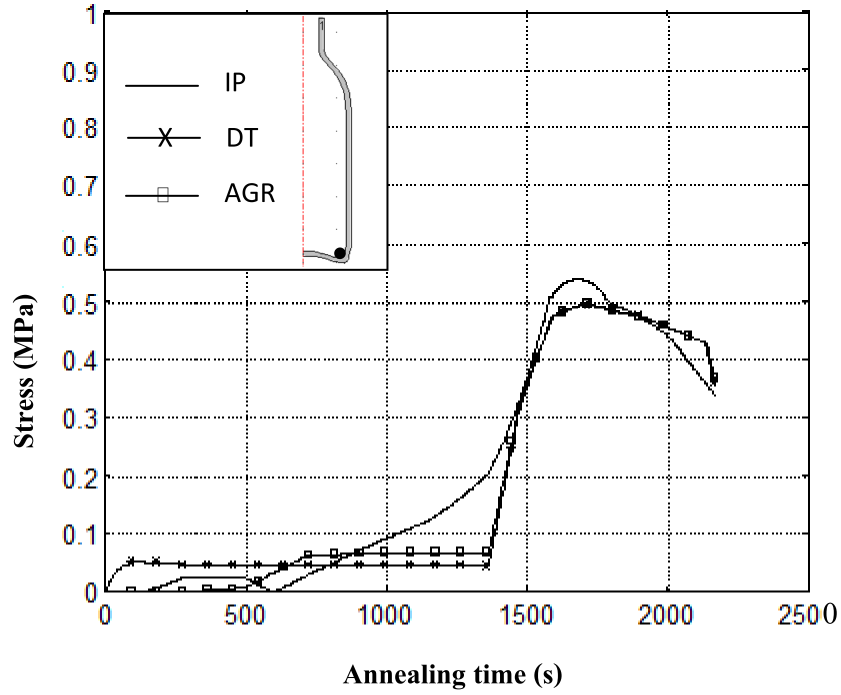
รูปที่ 6.52 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.53 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.54 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



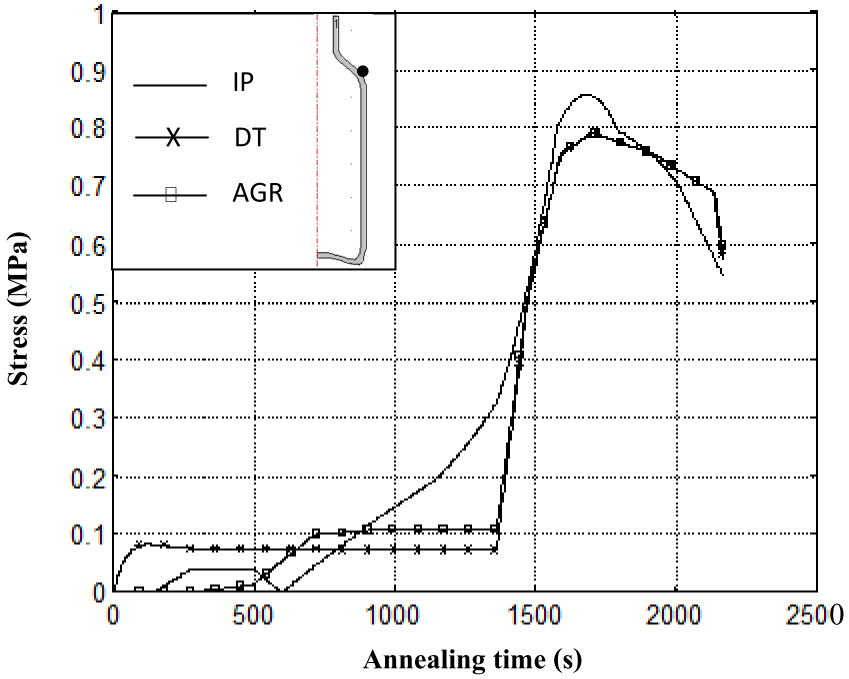
รูปที่ 6.55 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.50 – 6.55 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ Bในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อน ความเค้นจากแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับแบบอุณหภูมิ AGR และ IP ซึ่งความเค้นทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์การยอมรับโดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.3

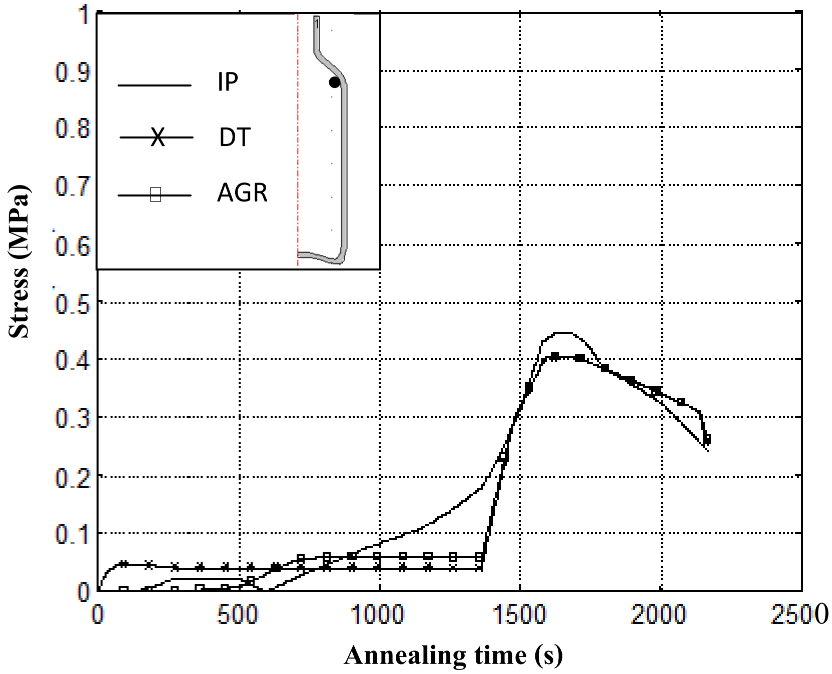
ตารางที่ 6.3 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

แบบอุณหภูมิอบอ่อน	**ผลการทำนายความเค้น (MPa)**						**ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)**
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**			
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ทุกตำแหน่ง**
IP	0.34	0.37	0.32	0.28	0.31	1.25	6
AGR	0.36	0.39	0.34	0.30	0.33	1.32	
DT	0.36	0.39	0.34	0.30	0.33	1.32	

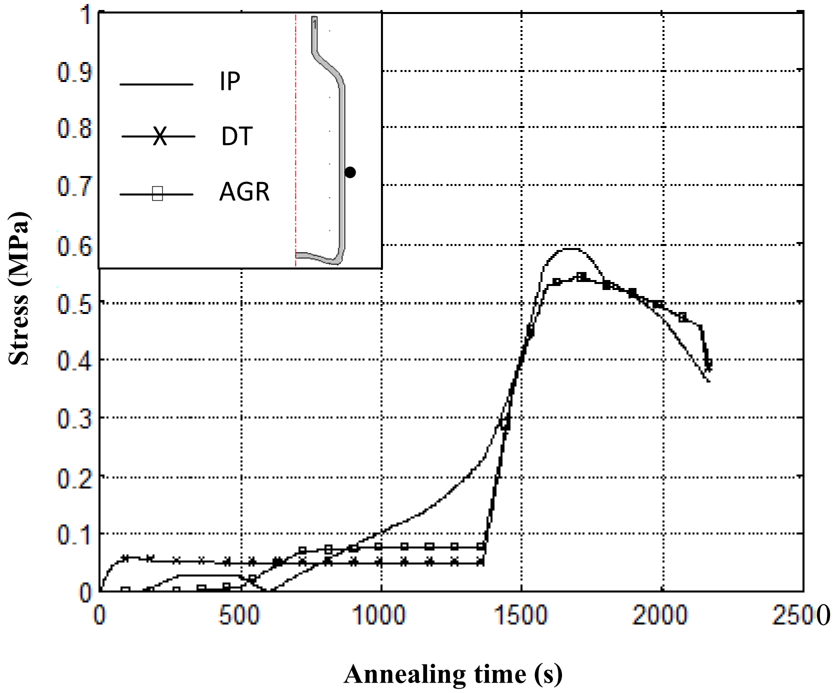
6.2.2.3 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



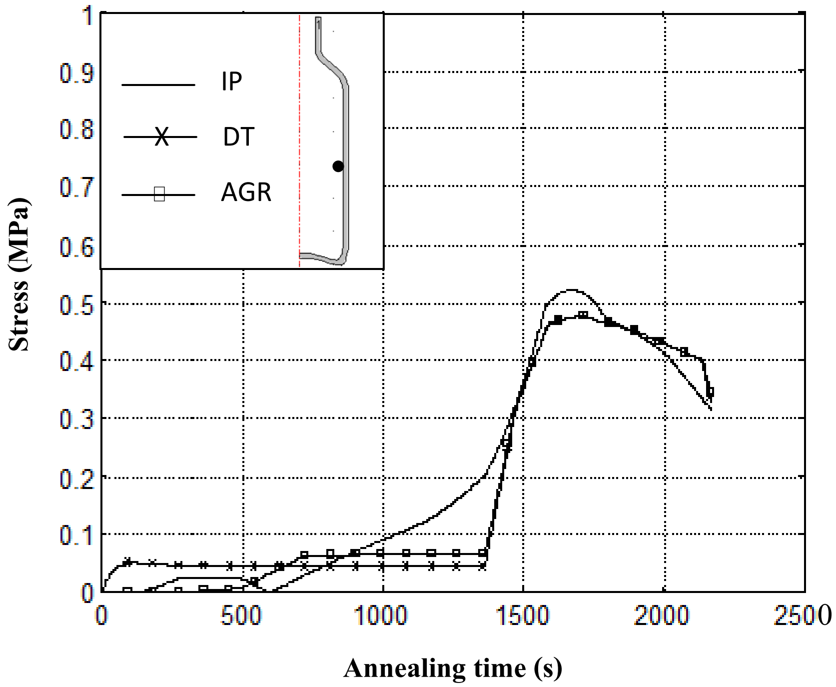
รูปที่ 6.56 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



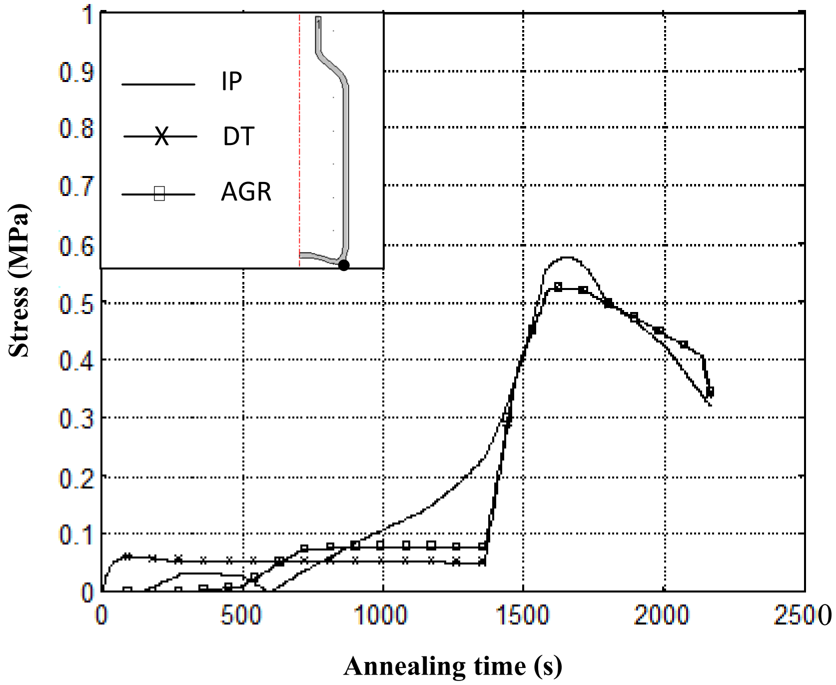
รูปที่ 6.57 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



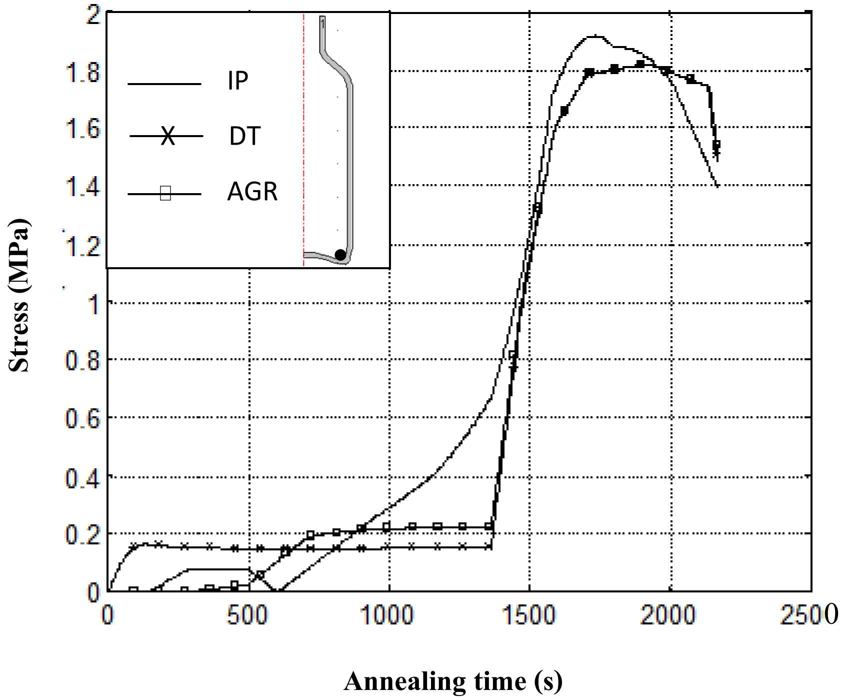
รูปที่ 6.58 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.59 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.60 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



รูปที่ 6.61 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.60 – 6.61 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP AGR และ DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ C ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อน ความเค้นจากแบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นค่าใกล้เคียงกับแบบอุณหภูมิ AGR และ IPความเค้นทั้งหมดมีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับโดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวด้านนอกและด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

แบบอุณหภูมิอบอ่อน	ผลการทำนายความเค้น (MPa)						ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน			
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ทุกตำแหน่ง
IP	0.54	0.36	0.32	0.24	0.31	1.39	6
AGR	0.59	0.39	0.33	0.25	0.33	1.51	
DT	0.59	0.39	0.33	0.25	0.33	1.48	

จากผลการทำนายความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสทั้ง 3 แบบ ที่เกิดจากแบบอุณหภูมิอบอ่อนที่พัฒนาขึ้น (DT), AGR และแบบอุณหภูมิที่ใช้จริงในกระบวนการผลิต ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะพบว่าความเค้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันน้อยมากและอยู่ในเกณฑ์กำหนดการตรวจสอบความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสที่ความหนา 3 มม. ซึ่งในการตรวจสอบพบว่าความเค้นมีค่าไม่เกิน 2 MPa จากการออกแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนโดยลดอุณหภูมิในช่วง Annealign region ให้ต่ำกว่าแบบอุณหภูมิของ AGR และ IP โดยยังคงขอบเขตอุณหภูมิช่วง Annealign region และอุณหภูมิช่วง Cooling region เช่นเดียวกับแบบอุณหภูมิ AGR จากการหาความสัมพันธ์พื้นที่ใต้กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนพบว่า แบบอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นสามารถลดพื้นที่ใต้กราฟจากแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้ 1.32 % และลดพื้นที่ใต้กราฟจากแบบอุณหภูมิ AGR ได้ 1.44 % ซึ่งการลดอุณหภูมิในการอบอ่อนจะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนโดยยังคงรักษาคุณภาพของบรรจุภัณฑ์แก้วให้ใกล้เคียงกับของเดิมได้และอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ

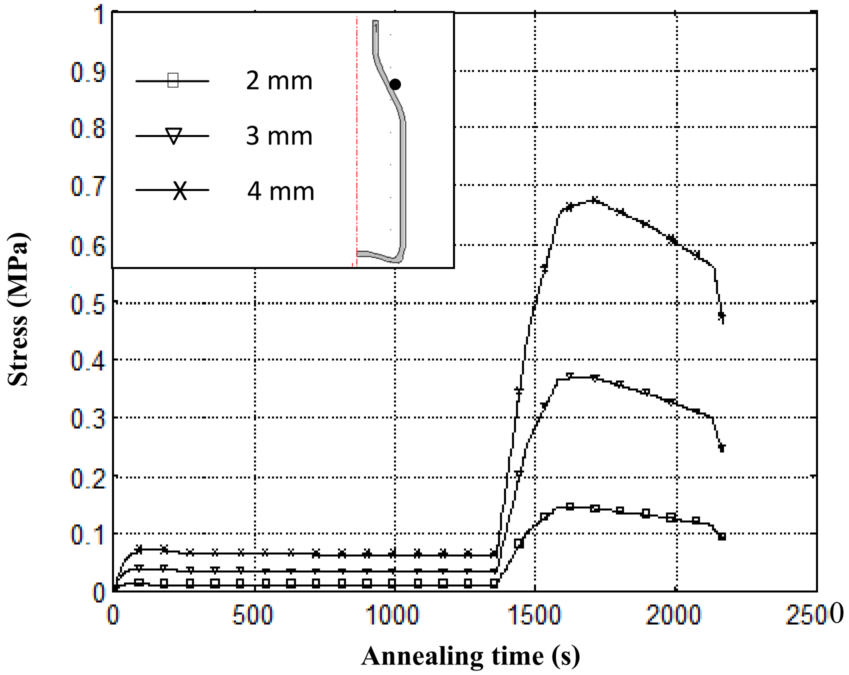
6.3 การศึกษาปัจจัยด้านความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบอ่อน

จากแบบอุณหภูมิอบอ่อนที่พัฒนาขึ้นสามารถทำให้ความเค้น ณ เวลาสุดท้ายในการอบอ่อนมีค่าใกล้เคียงกับแบบอุณหภูมิ IP และ AGR โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าจึงเลือกแบบอุณหภูมิ DT มาศึกษาปัจจัยด้านความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลต่ออุณหภูมิและความเค้นที่เกิดในกระบวนการอบอ่อน

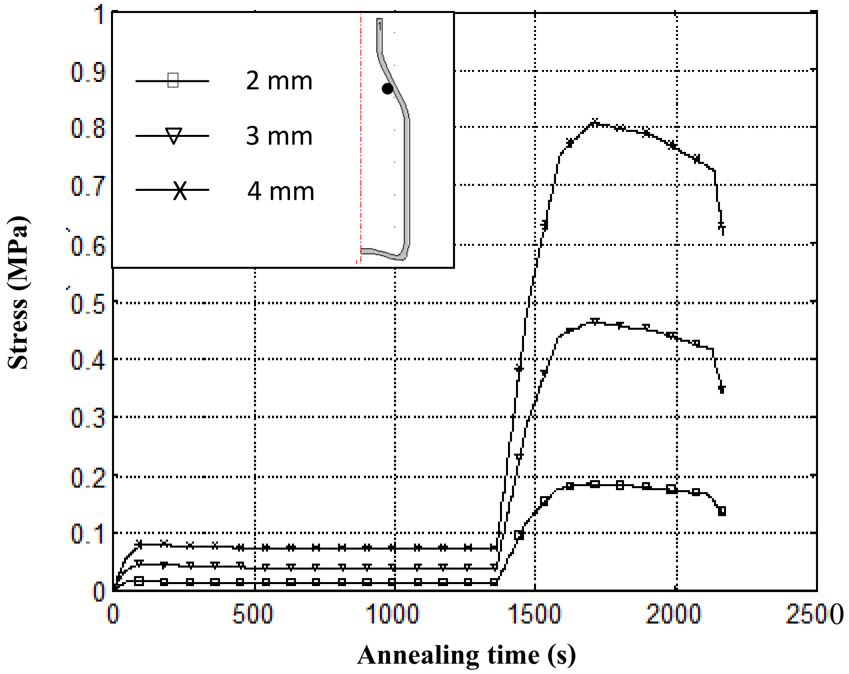
6.3.1 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนาสม่ำเสมอ

ผลการทำนายการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนาสม่ำเสมอกัน หนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ตามลำดับ ณ ตำแหน่งผิวด้านนอกและด้านในเมื่อแสดงผลในรูปแบบกราฟมีผลดังนี้

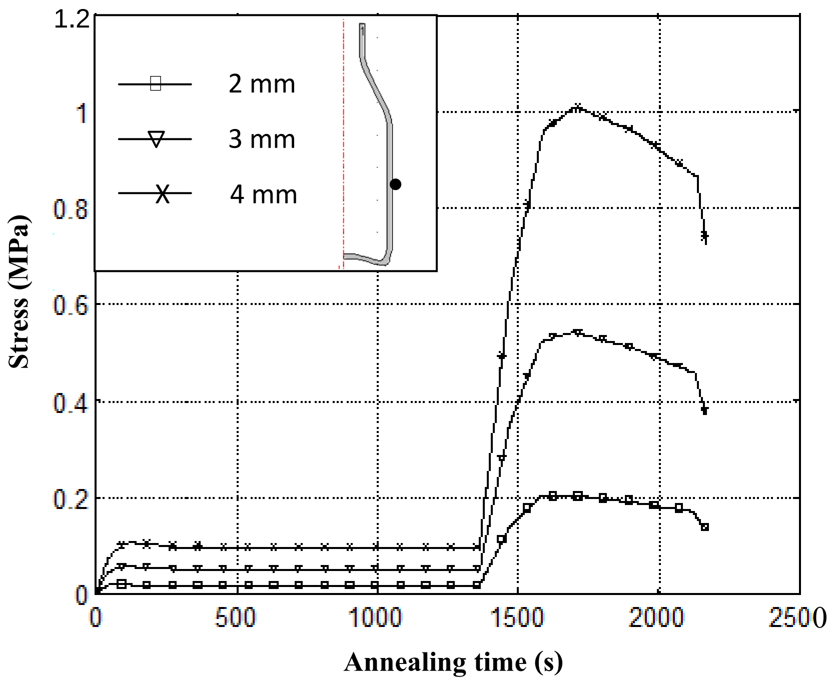
6.3.1.1 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบA



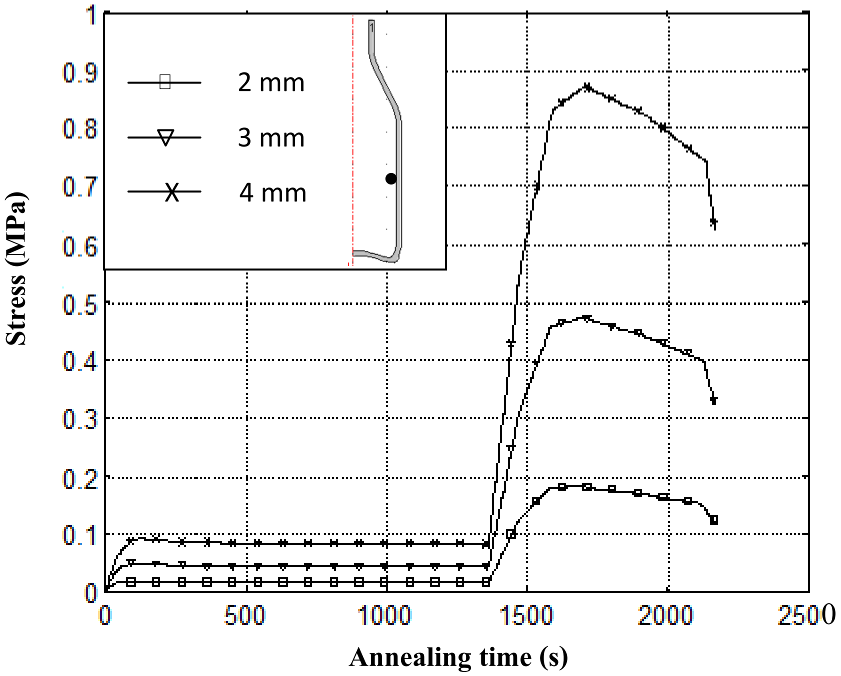
รูปที่ 6.62 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



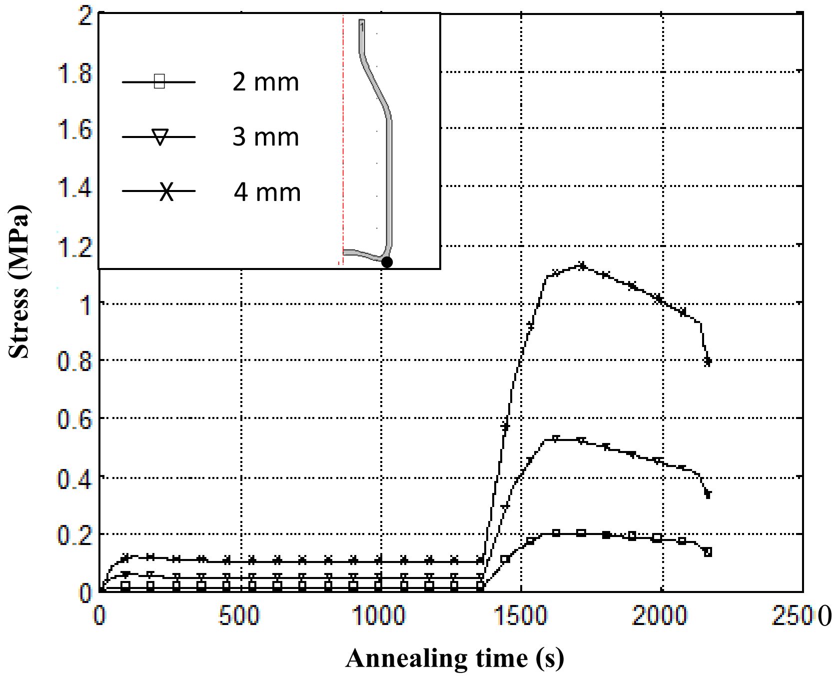
รูปที่ 6.63 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



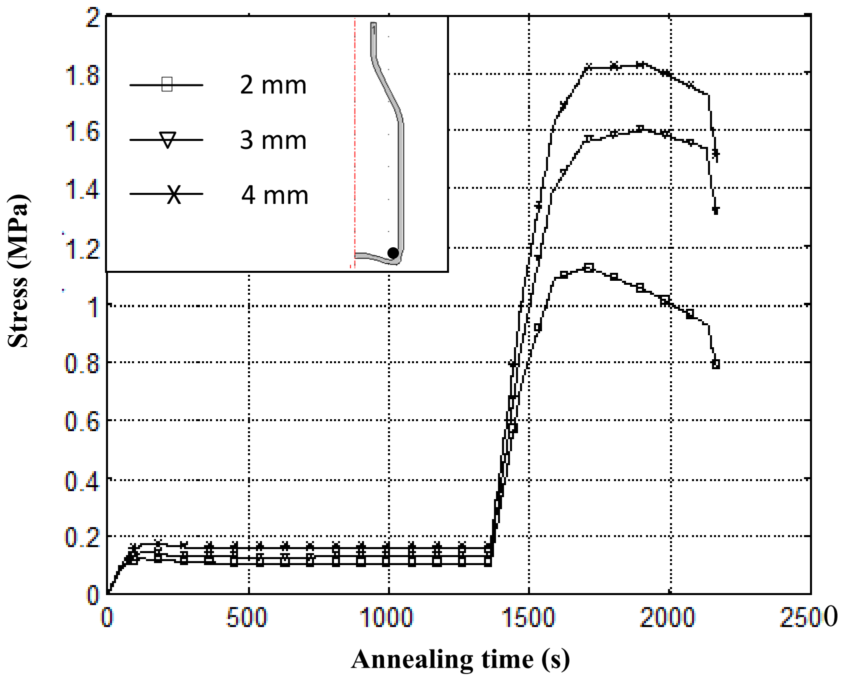
รูปที่ 6.64 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.65 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.66 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



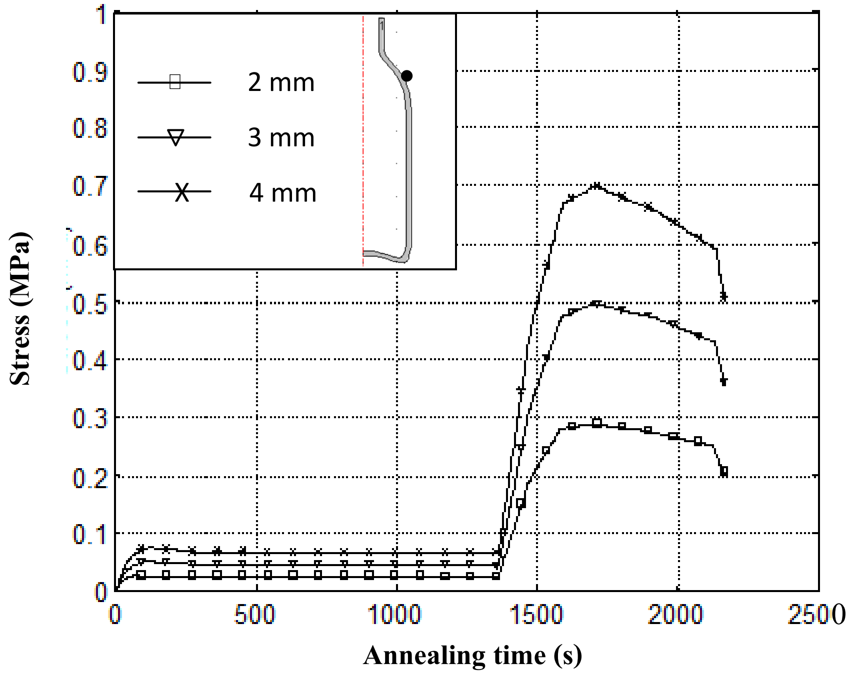
รูปที่ 6.67 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.61 – 6.66 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ A ความหนามสม่ำเสมอที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.5

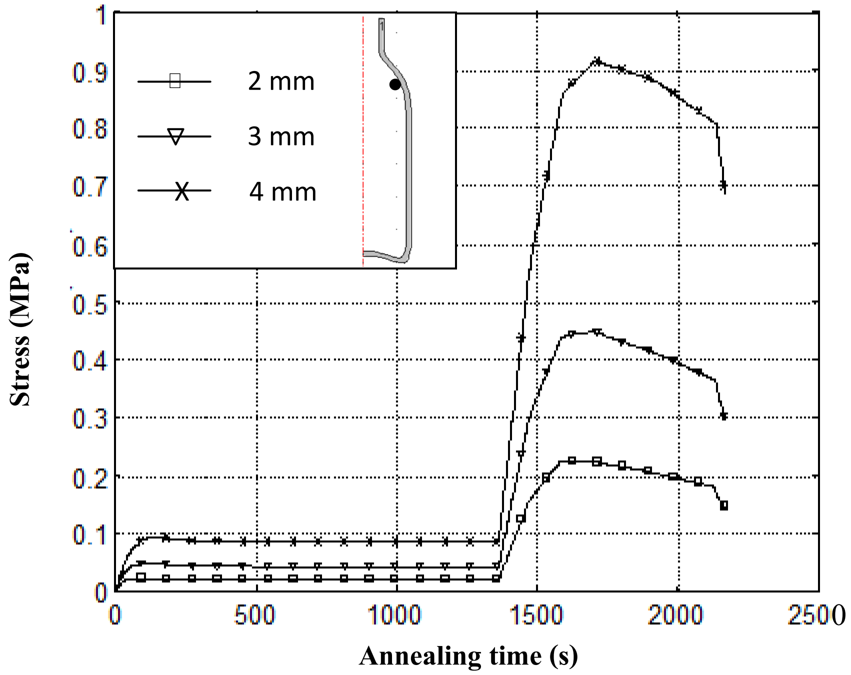
ตารางที่ 6.5 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

ความหนา (mm)	ผลการทำนายความเค้น (MPa)						ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน			
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ทุกตำแหน่ง
2	0.10	0.15	0.15	0.13	0.20	0.80	6
3	0.25	0.38	0.35	0.35	0.33	1.32	
4	0.48	0.75	0.80	0.62	0.62	1.50	

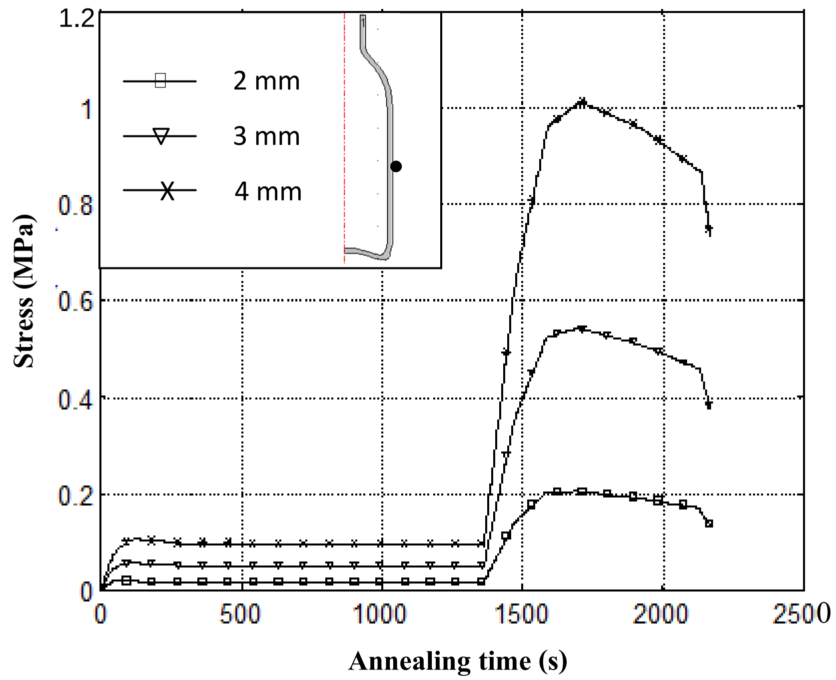
6.3.1.2 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบB



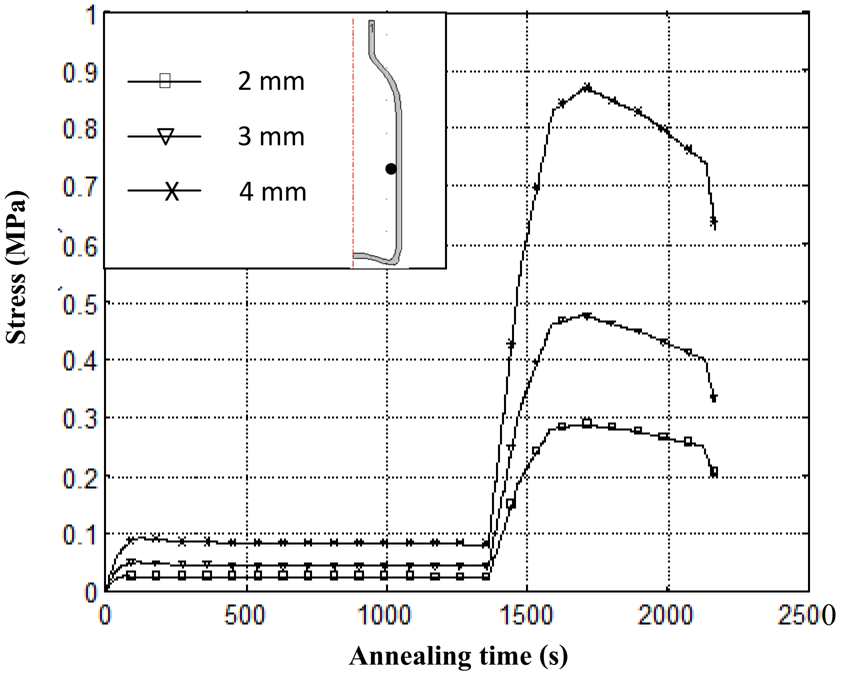
รูปที่ 6.68 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



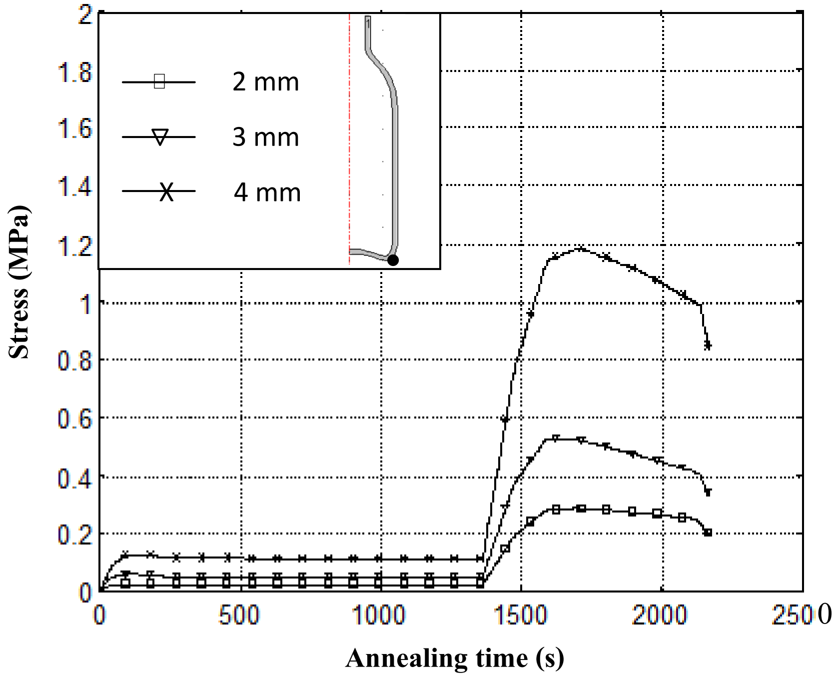
รูปที่ 6.69 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



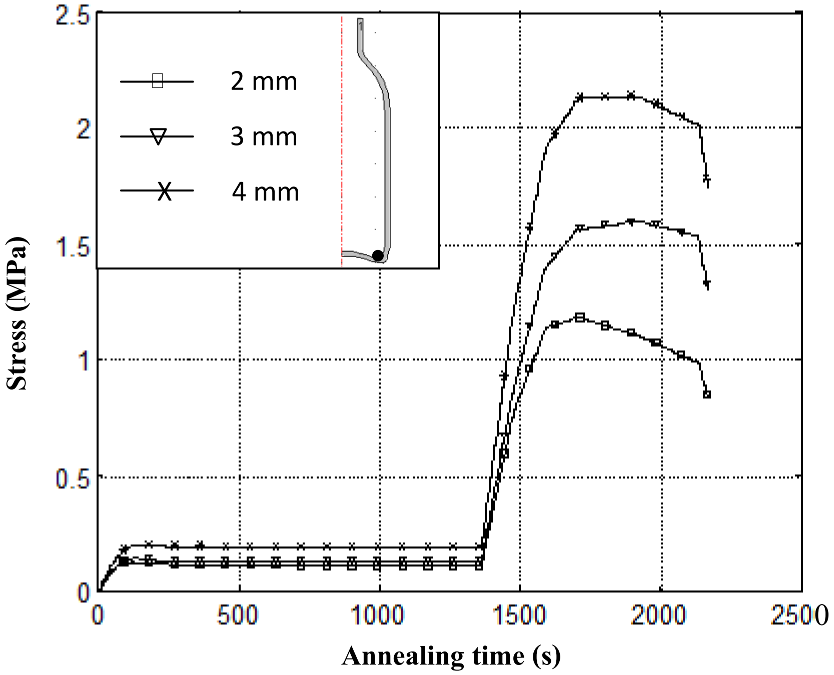
รูปที่ 6.70 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.71 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.72 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



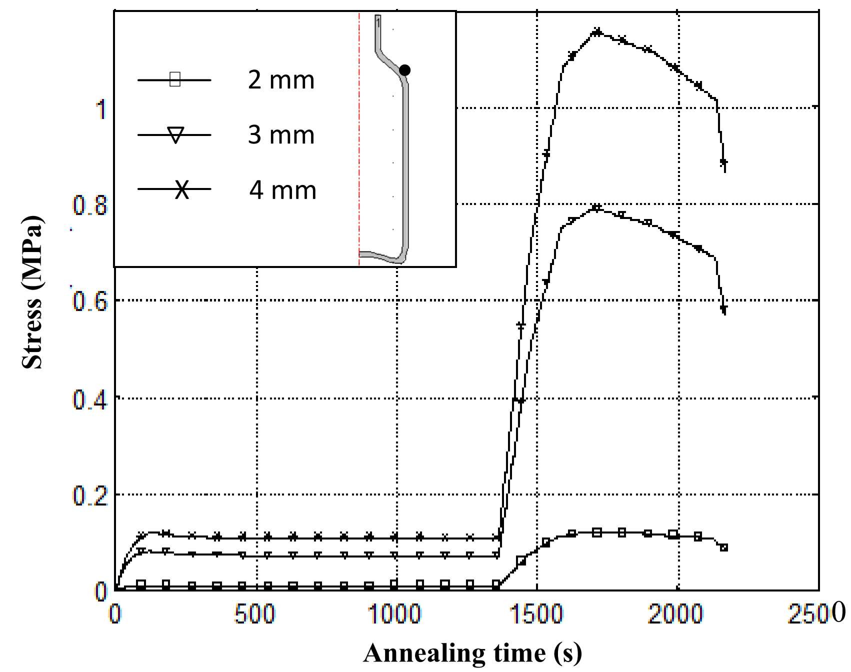
รูปที่ 6.73 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.67 – 6.72 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ B ความหนาสม่ำเสมอที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.6

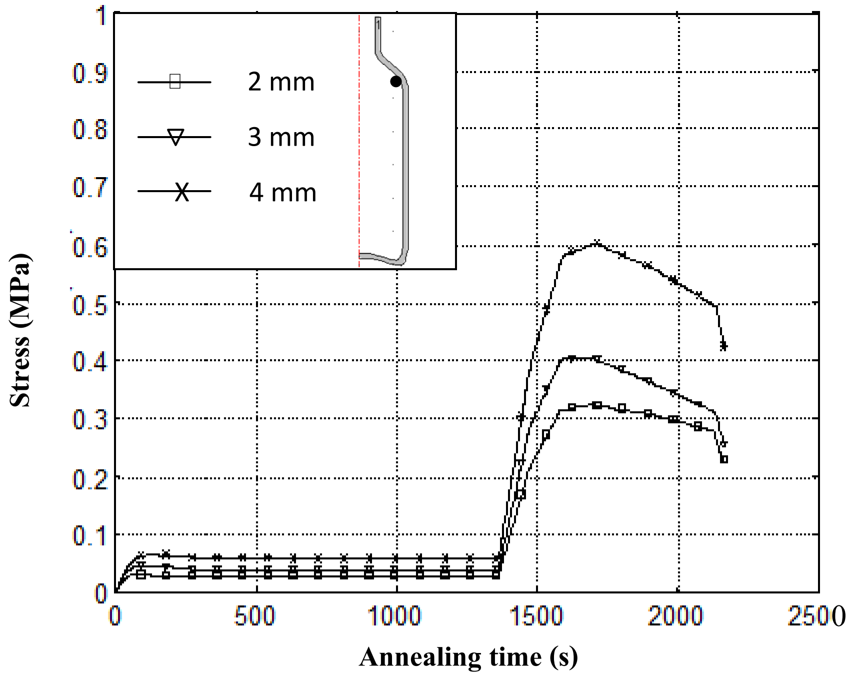
ตารางที่ 6.6 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

ความหนา (mm)	**ผลการทำนายความเค้น (MPa)**						**ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)**
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**			
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ทุกตำแหน่ง**
2	0.20	0.15	0.20	0.15	0.20	0.80	6
3	0.36	0.39	0.34	0.30	0.33	1.32	
4	0.51	0.75	0.82	0.70	0.65	1.75	

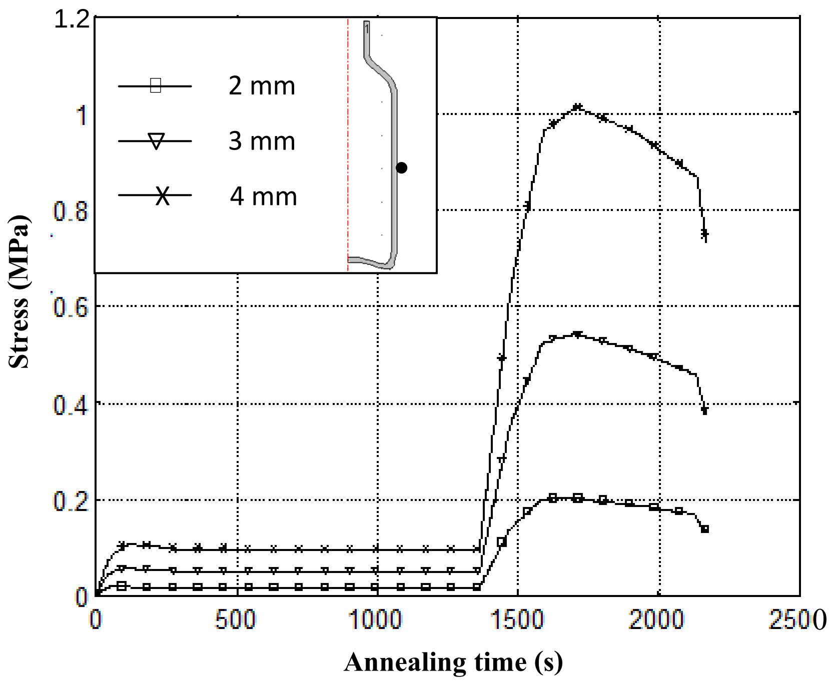
6.3.1.3 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



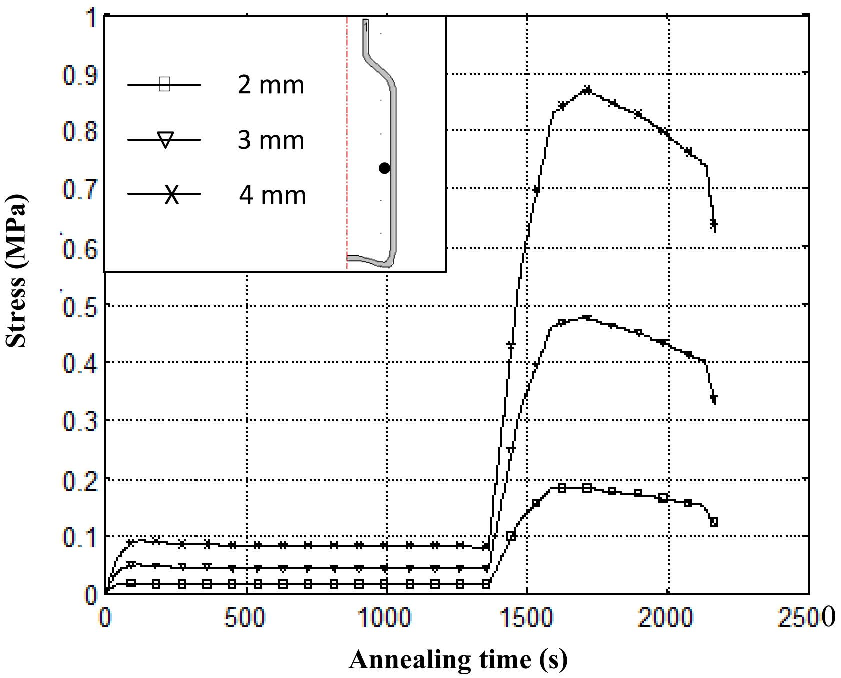
รูปที่ 6.74 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านนอก



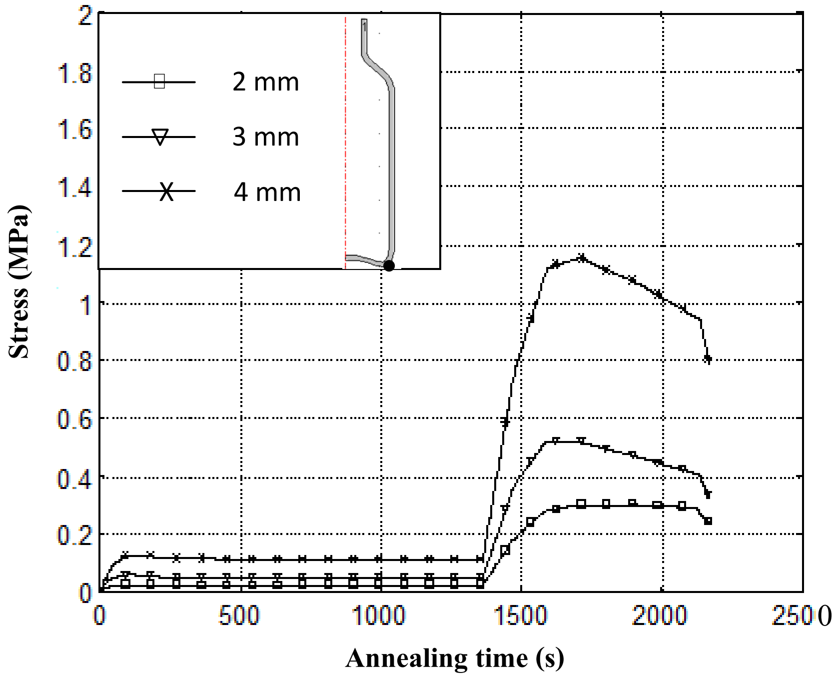
รูปที่ 6.75 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งไหล่ด้านใน



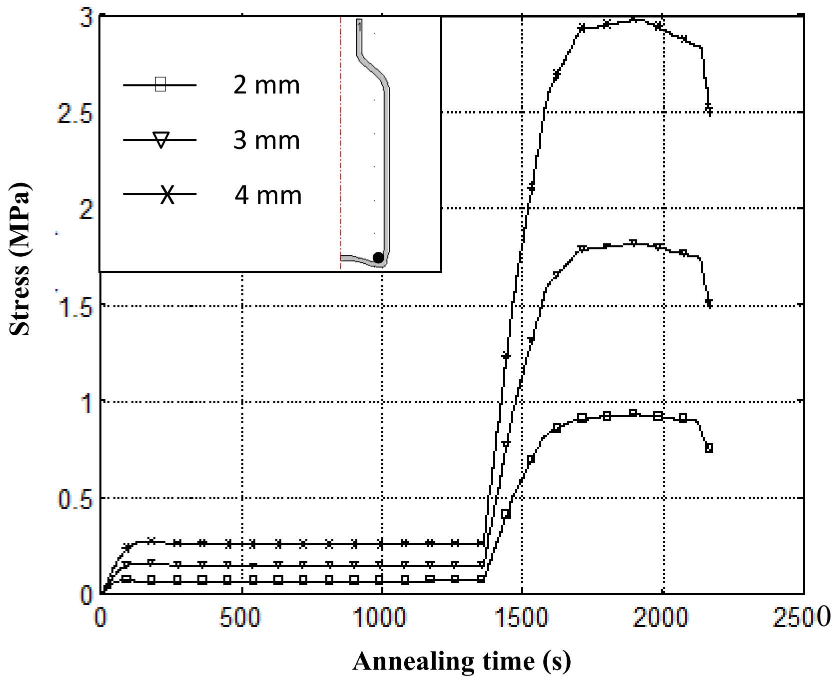
รูปที่ 6.76 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านนอก



รูปที่ 6.77 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งลำตัวด้านใน



รูปที่ 6.78 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านนอก



รูปที่ 6.79 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม.จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ตำแหน่งมุมก้นด้านใน

จากรูปที่ 6.73–6.78 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ C ความหนามสม่ำเสมอที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.7

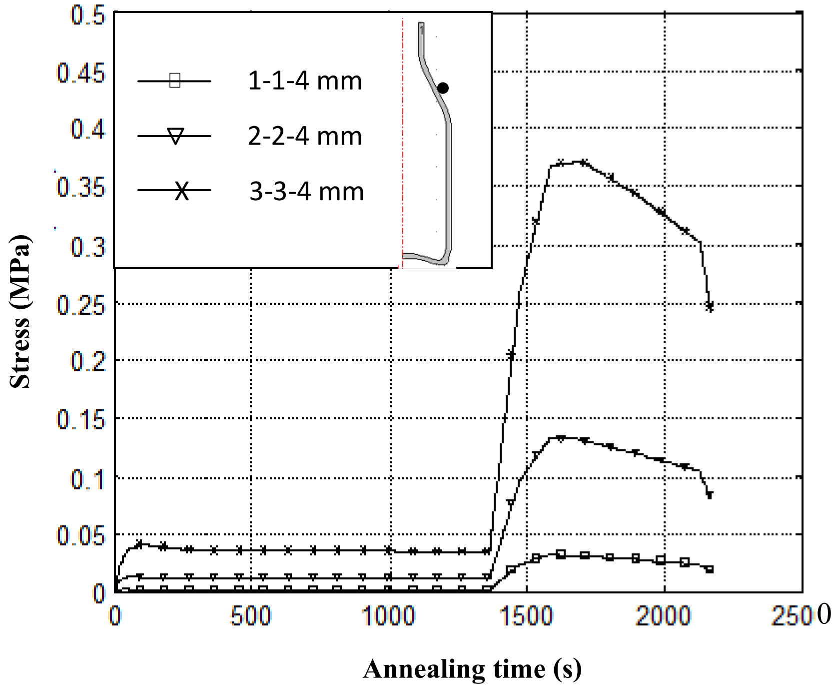
ตารางที่ 6.7 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 2 มม., 3 มม.และ 4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

ความหนา (mm)	ผลการทำนายความเค้น (MPa)						ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน			
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ทุกตำแหน่ง
2	0.12	0.15	0.25	0.24	0.13	0.75	6
3	0.59	0.39	0.33	0.25	0.33	1.48	
4	0.89	0.75	0.80	0.42	0.63	2.50	

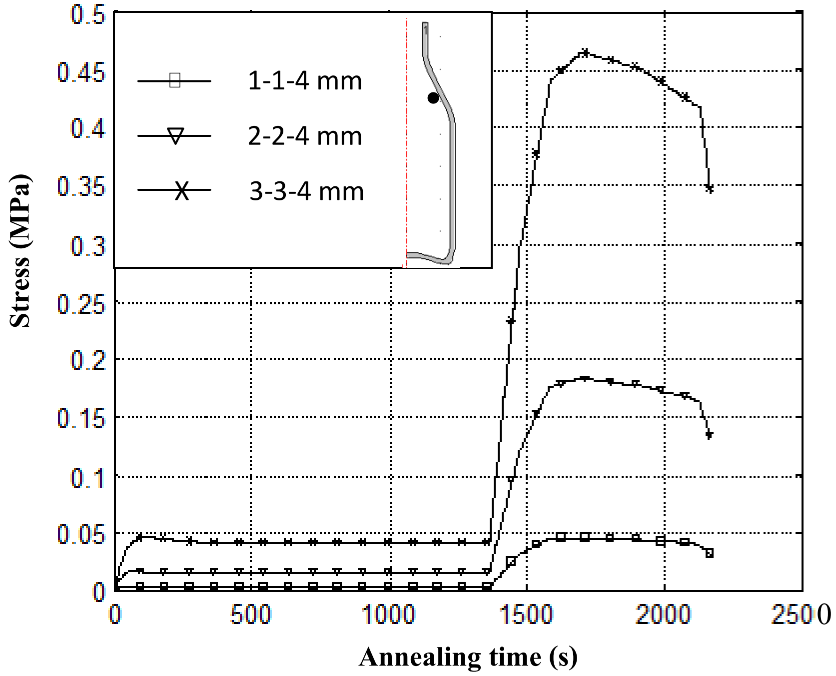
6.3.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นและอุณหภูมิของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนาไม่สม่ำเสมอกัน

ผลการทำนายการกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนาไม่สม่ำเสมอกัน โดยแบ่งความหนาตามตำแหน่งไหล่-ลำตัว-ก้นขวด ดังนี้ 1-1-4 มม., 2-2-4 มม.และ 3-3-4 มม. ณ ตำแหน่งผิวด้านนอกและด้านในเมื่อแสดงผลในรูปแบบกราฟมีผลดังนี้

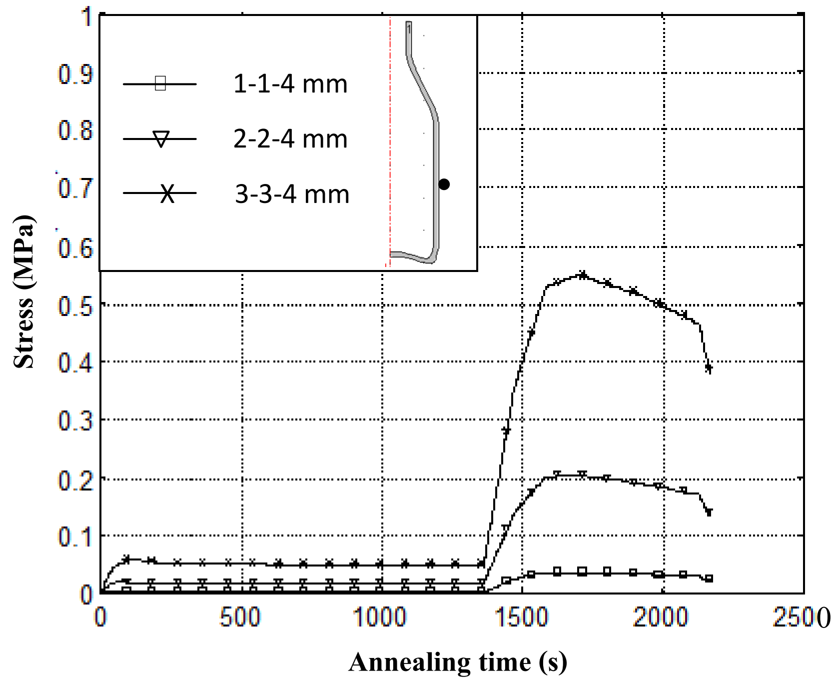
6.3.2.1 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



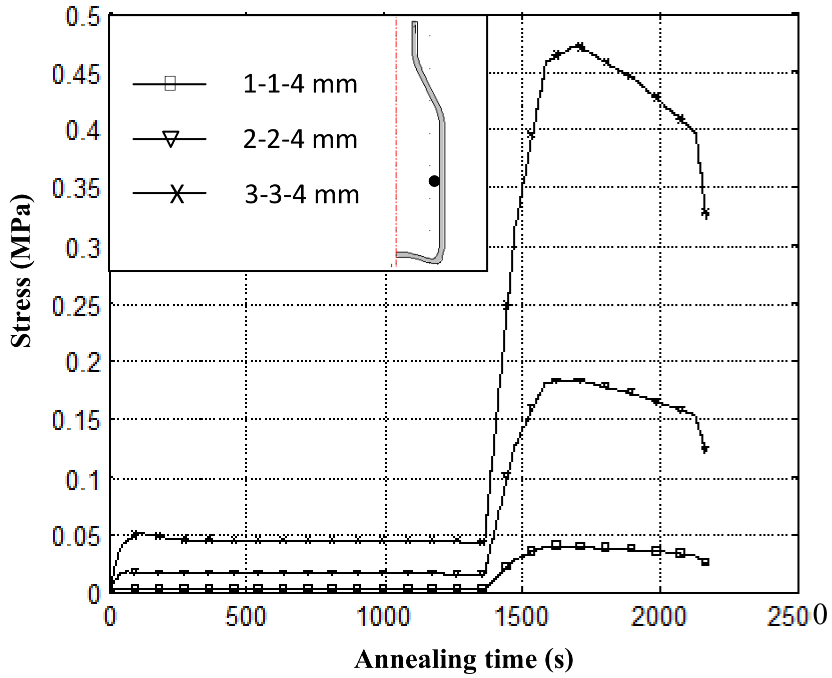
รูปที่ 6.80 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



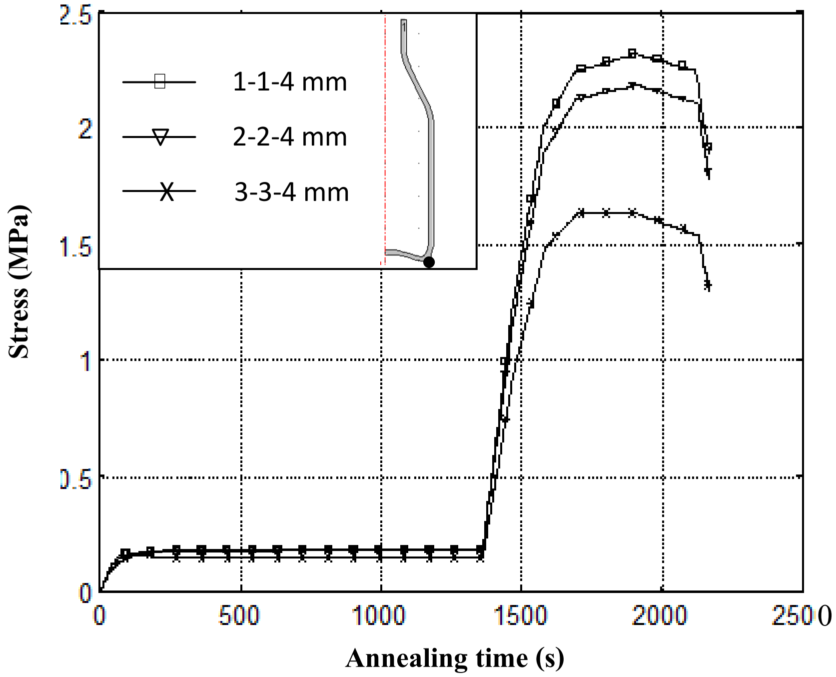
รูปที่ 6.81 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



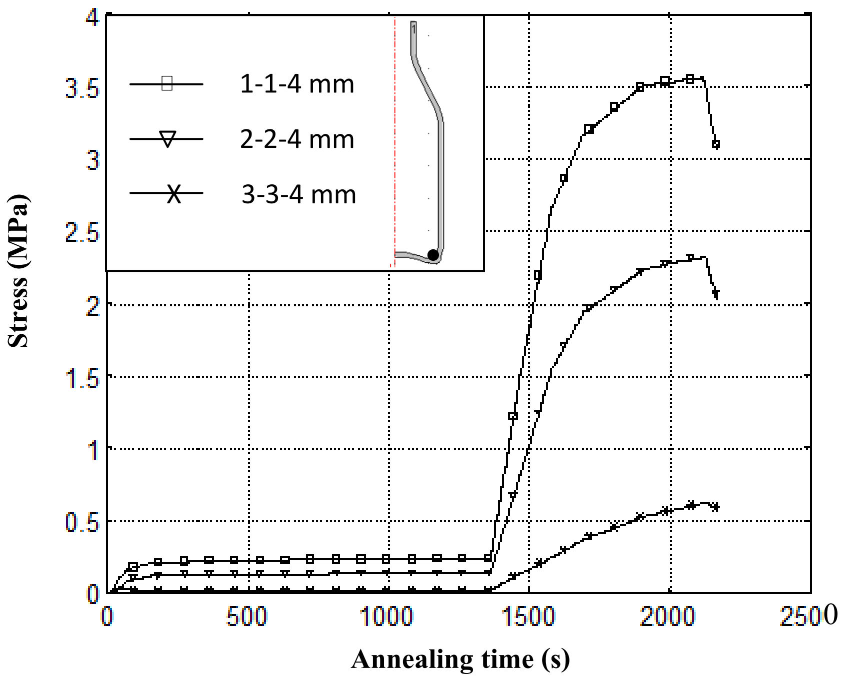
รูปที่ 6.82 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



รูปที่ 6.83 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



รูปที่ 6.84 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A



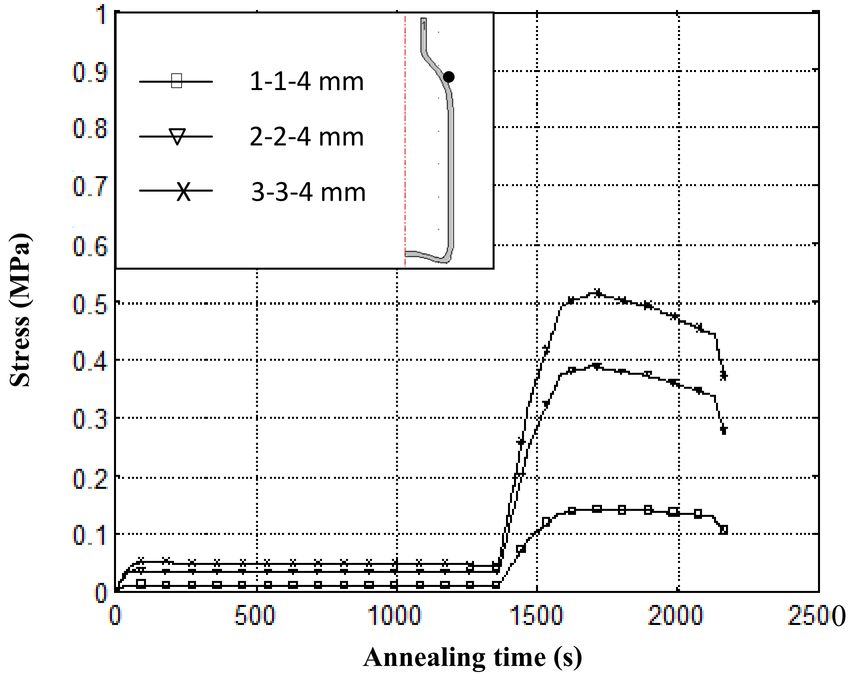
รูปที่ 6.85 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ

จากรูปที่ 6.80 – 6.85 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ A ความหนาไม่สม่ำเสมอที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม.และ 3-3-4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นความหนา ณ ตำแหน่งไหล่และลำตัว ส่วนความเค้นที่มุมก้นจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความหนาของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.8

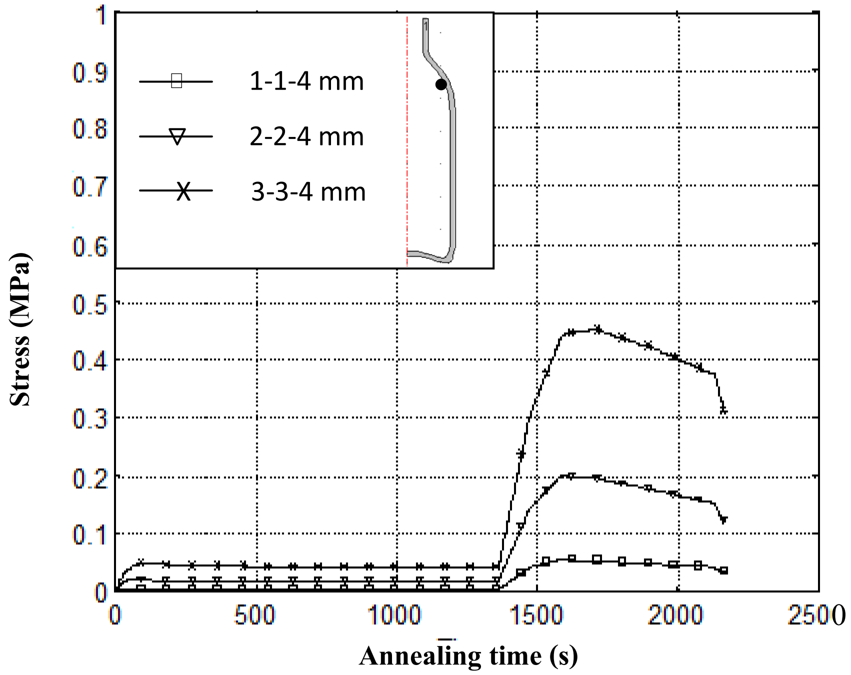
ตารางที่ 6.8 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ความหนา (mm)	**ผลการทำนายความเค้น (MPa)**						**ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)**
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**			
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ทุกตำแหน่ง**
1-1-4	0.02	0.02	1.89	0.03	0.03	3.06	6
2-2-4	0.08	0.15	1.78	0.13	0.12	2.04	
3-3-4	0.24	0.38	0.58	0.35	0.32	1.30	

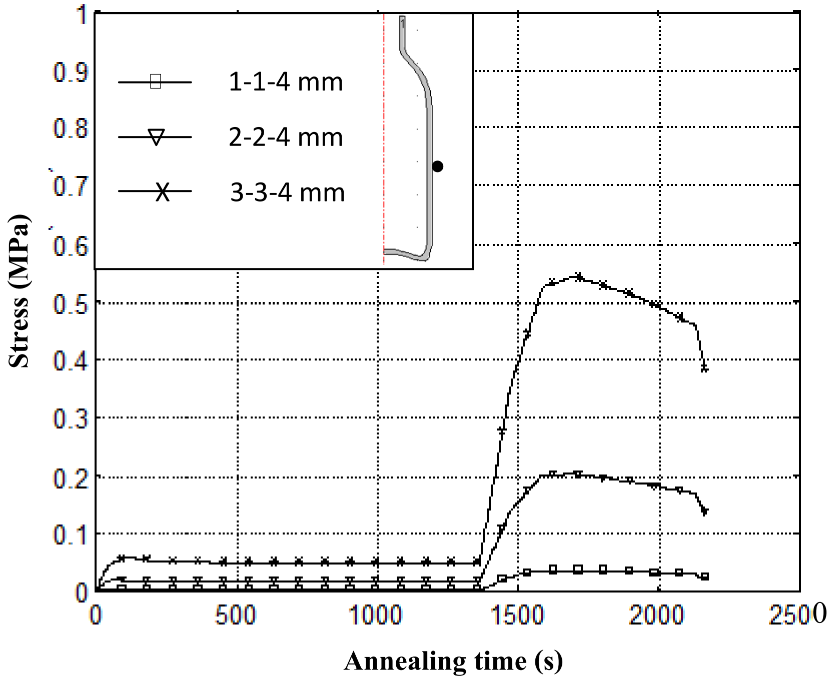
6.3.2.2 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



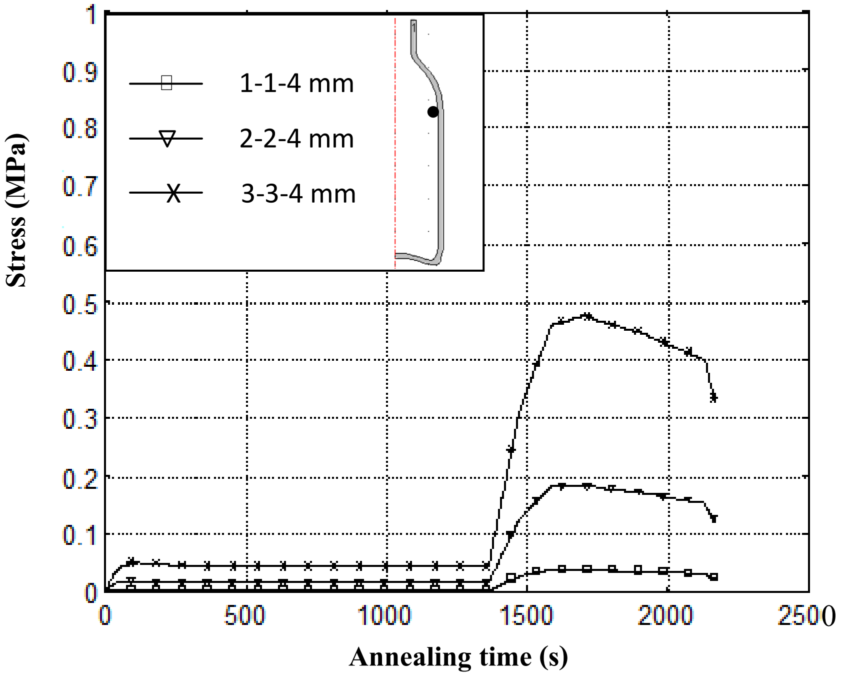
รูปที่ 6.85 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



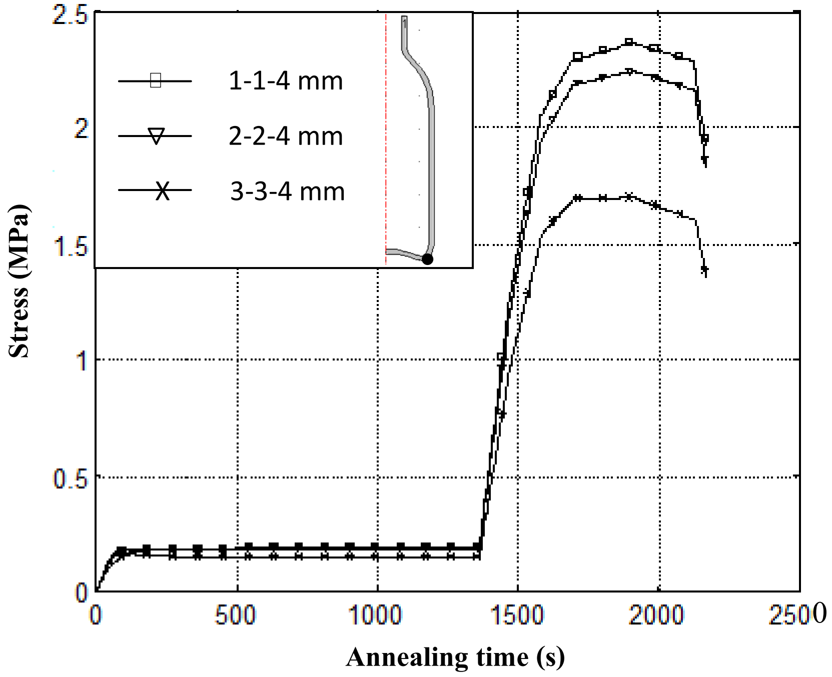
รูปที่ 6.86 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



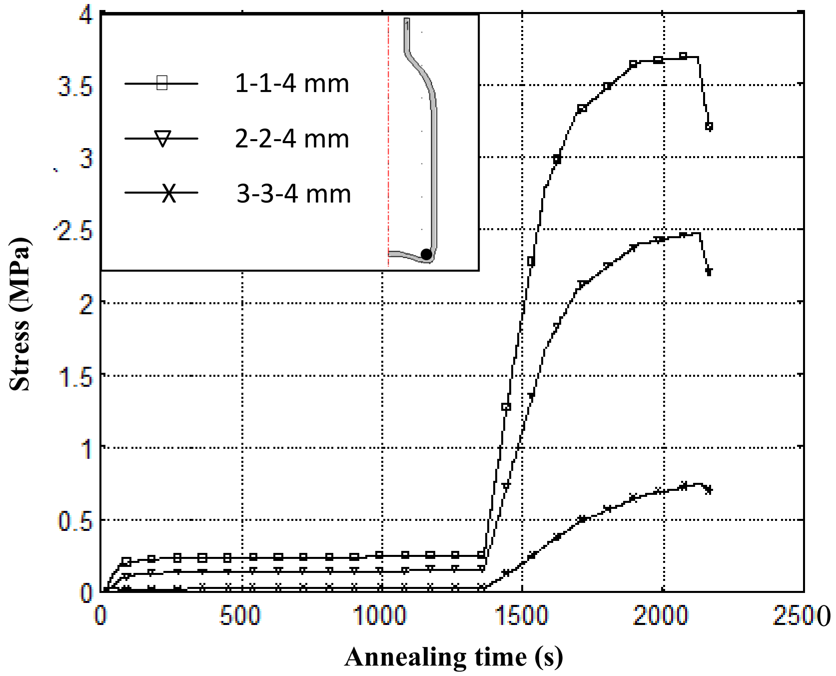
รูปที่ 6.87 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



รูปที่ 6.88 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



รูปที่ 6.89 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B



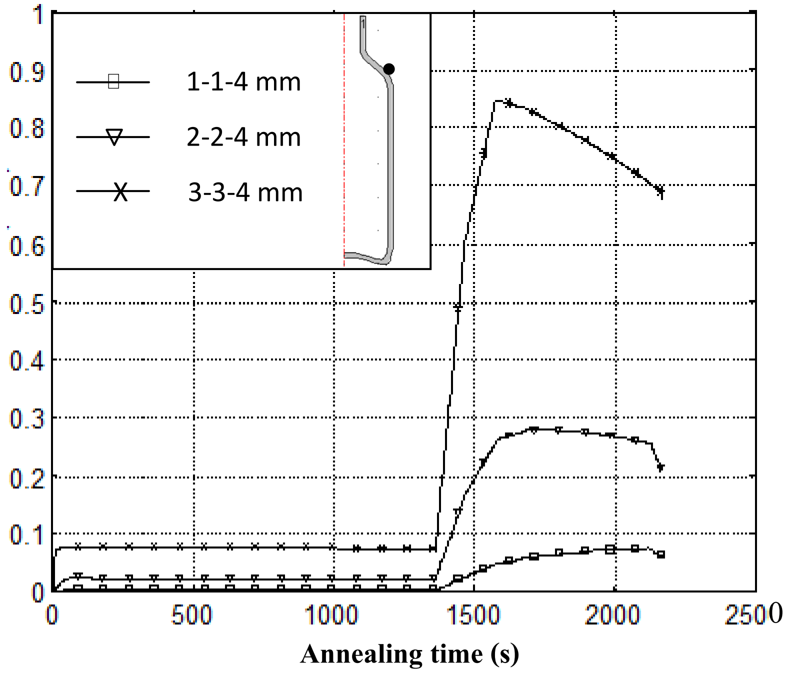
รูปที่ 6.90 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ

จากรูปที่ 6.85 – 6.90 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ B ความหนาไม่สม่ำเสมอที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4มม.และ 3-3-4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความหนา ณ ตำแหน่งไหล่และลำตัว ส่วนความเค้นที่มุมก้นจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความหนาของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.9

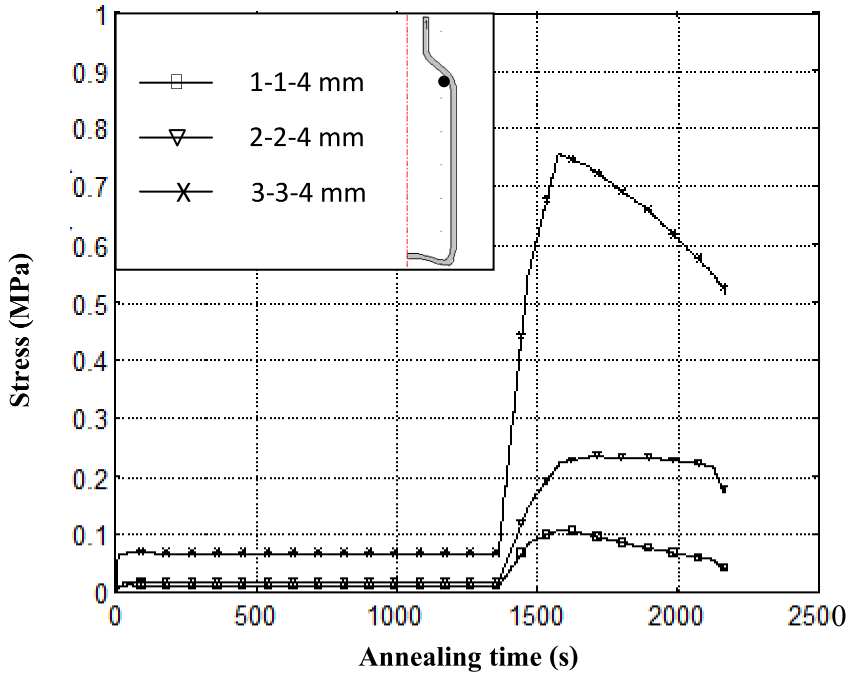
ตารางที่ 6.9 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 1-1-4 มม.,2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

ความหนา (mm)	ผลการทำนายความเค้น (MPa)						ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน			
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ทุกตำแหน่ง
1-1-4	0.10	0.02	1.92	0.04	0.02	3.18	6
2-2-4	0.27	0.14	1.84	0.12	0.12	2.18	
3-3-4	0.36	0.37	1.36	0.30	0.32	0.70	

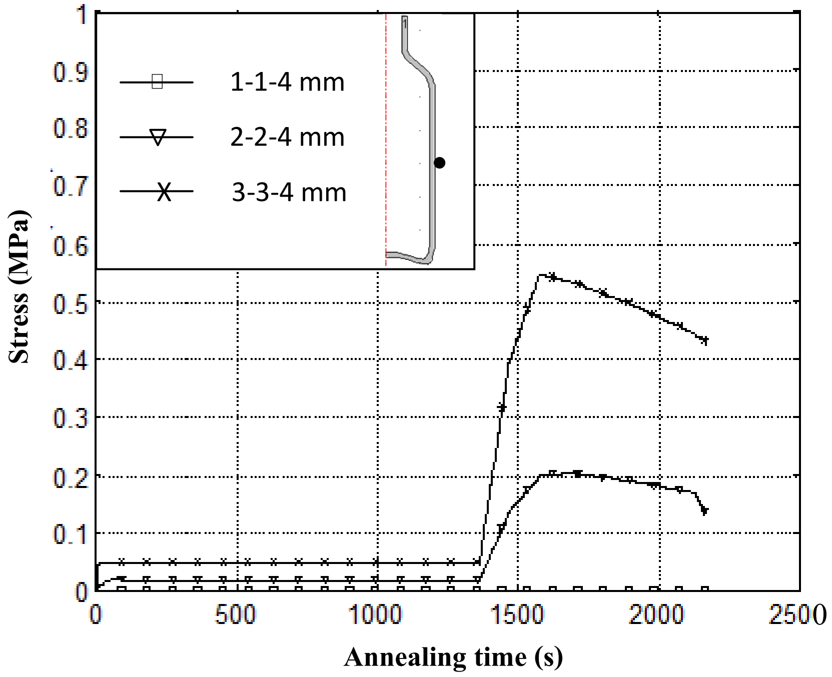
6.3.2.3 การกระจายตัวของความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



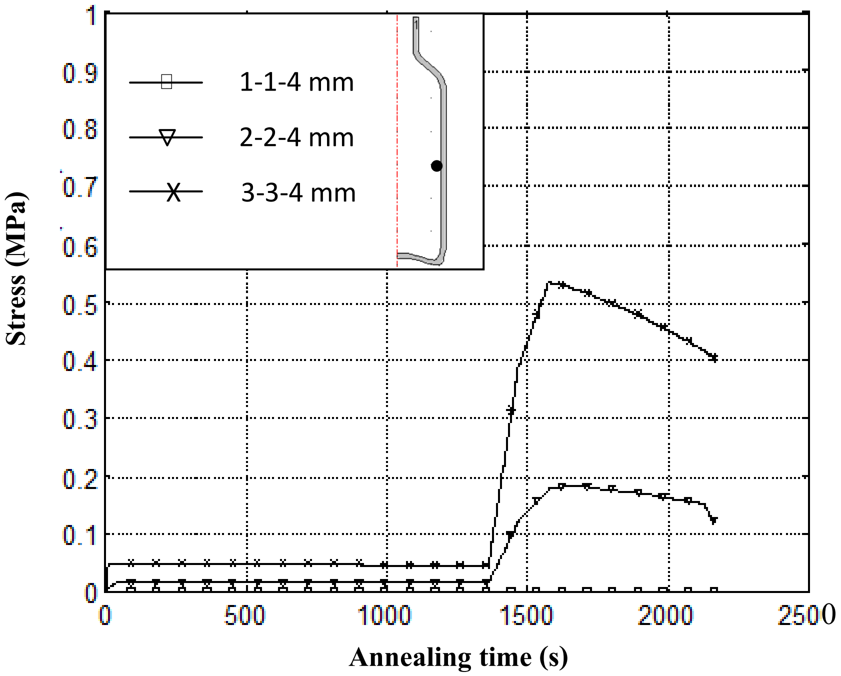
รูปที่ 6.91 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



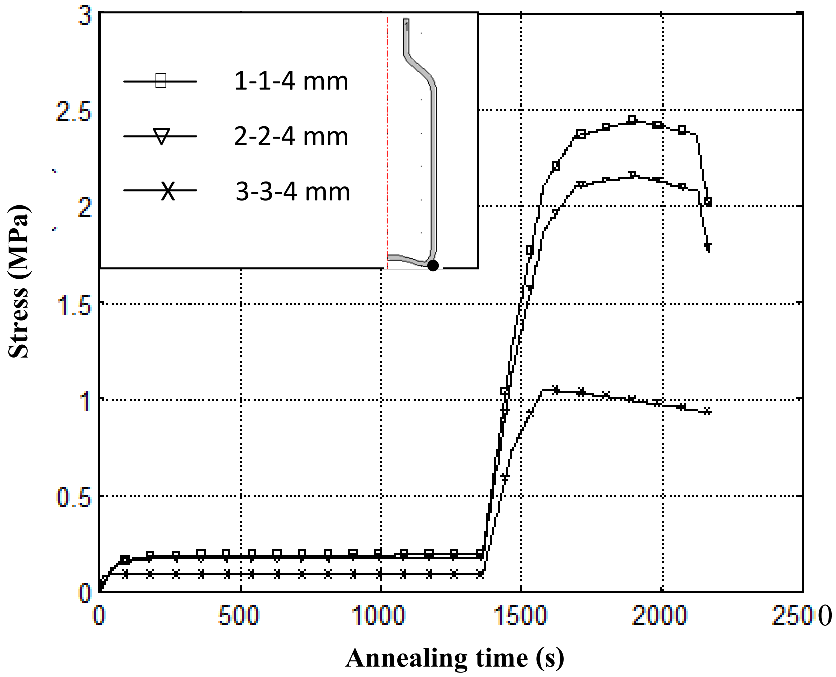
รูปที่ 6.92 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



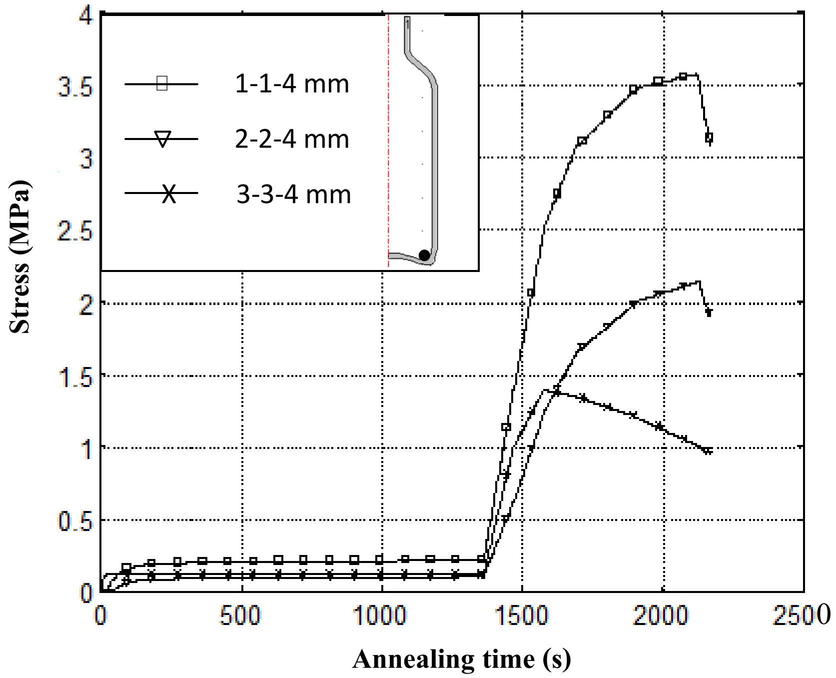
รูปที่ 6.93 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



รูปที่ 6.94 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



รูปที่ 6.95 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C



รูปที่ 6.96 การเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C

จากรูปที่ 6.91– 6.96 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อนDT จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นที่ผิวภายนอกและภายในของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสแบบ C ความหนาไม่สม่ำเสมอที่ความหนา 1-1-4มม., 2-2-4มม.และ 3-3-4 มม. ในตำแหน่งไหล่ ลำตัว และมุมก้นตามลำดับ ผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ณ เวลาสิ้นสุดของกระบวนการอบอ่อนความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความหนา ณ ตำแหน่งไหล่และลำตัว ส่วนที่ตำแหน่งมุมก้นความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความหนาของบรรจุภัณฑ์โดยมีรายละเอียดของผลการทำนายตามตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ผลการทำนายความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ความหนา 1-1-4 มม., 2-2-4 มม. และ 3-3-4 มม. ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

ความหนา (mm)	**ผลการทำนายความเค้น (MPa)**						**ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับ (MPa)**
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**			
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ทุกตำแหน่ง**
1-1-4	0.06	0.00	2.00	0.17	0.00	3.09	6
2-2-4	0.21	0.13	1.76	0.19	0.12	1.90	
3-3-4	0.67	0.42	0.92	0.51	0.39	0.95	

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัย

7.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาตร์เชิงพลวัต

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตและทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นของบรรจุภัณฑ์แก้วสีใสโดยใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทำนายได้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกัน ส่วนการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นพบว่าค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์กำหนดการยอมรับเชิงพานิชย์ของบรรจุภัณฑ์แก้ว โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตที่พัฒนาขึ้นมีรูปแบบดังนี้

แบบจำลองอุณหภูมิทางคณิตศาสตร์

$$\rho Cp\frac{\partial T_g}{\partial t}+\rho Cp(u_r\frac{\partial T_g}{\partial r}+u_z\frac{\partial T_g}{\partial z}) = k\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_g}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T_g}{\partial z}\right)\right)$$

แบบจำลองความเค้นทางคณิตศาสตร์

$$\rho\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\right)-(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_r)+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}) = 0$$

7.2 การพัฒนาแบบอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อน

การปรับอัตราการคายความร้อนในช่วง Annealing region ให้สม่ำเสมอโดยใช้ขอบเขตอุณหภูมิช่วง Annealing region เท่ากับของ AGR คือ 550 °C – 490 °C ซึ่งทำให้สามารถลดอุณหภูมิในช่วง Annealing region และใช้อัตราการคายความร้อนที่สูงอย่างสม่ำเสมอในช่วง Cooling region จากผลการทำนายความเค้นที่ได้จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP, AGR และ DT ให้ค่าความเค้น ณ เวลาสิ้นสุดกระบวนการอบอ่อนใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์กำหนดการยอมรับเชิงพานิชย์ของบรรจุภัณฑ์แก้วและได้ทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนพบว่าแบบอุณหภูมิ DT สามารถลดพื้นที่เมื่อเทียบกับแบบอุณหภูมิ IP และ AGR ได้ 1.32 % และ 1.44 % ตามลำดับ ดังนี้แบบอุณหภูมิ DT ที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถช่วยลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อนโดยได้บรรจุภัณฑ์แก้วที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตจริง

7.3 การศึกษาปัจจัยด้านความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลต่อความเค้นที่เกิดในกระบวนการอบอ่อน

จากแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT ที่พัฒนาขึ้นในข้อ 7.2 จึงได้นำแบบอุณหภูมิอบอ่อนดังกล่าวมาทำนายปัจจัยด้านความหนาของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ส่งผลการเกิดความเค้นในการอบอ่อน โดยได้ศึกษาทั้งความหนาแบบสม่ำเสมอและความหนาแบบไม่สม่ำเสมอ จากการศึกษาผ่านการทำนายความเค้นพบว่า ที่ความหนาแบบสม่ำเสมอความเค้นที่เกิดขึ้นในการอบอ่อนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาส่วนที่ความหนาแบบไม่สม่ำเสมอ ณ ตำแหน่งไหล่และลำตัวซึ่งกำหนดให้เป็นความหนาแบบสม่ำเสมอจะเกิดค่าความเค้นเช่นเดียวกับกรณีแรก แต่ที่มุมก้นบรรจุภัณฑ์ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความหนา โดยเฉลี่ยความเค้นที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 – 3.5 เท่าต่อความหนาที่เพิ่มขึ้น 1 มม.ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและลักษณะรูปร่างบรรจุภัณฑ์แก้ว

รายการอ้างอิง

[1] Michael Metzger, Rainer Backofen, Optimal temperature profiles for annealing of GaAs-Crystals, Journal of Crystal Crowth 220 (2000) : 6 – 15.

[2] Margolis, B. I., Modeling temperature fields in glass articles in annealing, Science for glass production, Vol. 60, Nos. 1 – 2, (2003) : 33 – 35.

[3] Shutov, A. I., Ostapko, A. S., and Ostapko T. S., The effect of complex thermal treatment parameters on properties of sheet glass, Science for glass production, Vol. 60, Nos. 7 – 8, (2003) : 202 – 204.

[4] Darif, M., and Semmar, N., Numerical simulation of Si nanosecond laser annealing by comsol multiphysics, Excerpt from the proceedings of the comsol conference (2008): 35 – 40.

[5] Adams, L. H., and Williamson E. D., Temporary and permanent strain, pp. 835 – 870, J. Franklin Inst., 190, 1920.

[6] Littleton, J. T., and Roberts, E. H., Annealing optical glass, pp. 202-224, J. Optical Soc. Am., 4, 1920.

[7] Lalykin, N. V., and Mazurin, O. V., Mathematical model of sheet glass annealing, pp. 13-15, Stekllo keram., No. 1, 1977.

[8] American Glass Research, Inc., Glass annealing basic principle, Cord and annealing training Session, 1944.

[9] Tooley, Fay V., Annealing and temperature, The handbook of glass manufacture, volume II, 1974.

[10] มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์, 2545.

[11] สุภาสินี ลิมปานุภาพ ซีท. วัสดุศาสตร์ขั้นแนะนำ. ภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552.

[12] สมชาย ปกรโฌดม. การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์รุ่งเกียรติ, 2522.

[13] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง. การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ ฟิสิกเซนเตอร์, 2547.

[14] ปราโมทย์ เดชะอำไพ.ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

[15] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ ฟิสิกเซนเตอร์, 2546.

[16] สมศรี จงรุ่งเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ สมศรี จงรุ่งเรือง, 2542.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ตารางที่ ก-1ค่าคงที่ต่าง ๆ

คุณสมบัติ	ค่าที่ตรวจสอบได้
Young modulus (Pa)	71641E6
Poisson's ratio	0.22
Density (kg/m^3)	2502.8
Coefficient of thermal expansion (1/K)	8.98E-6
Thermal conductivity (W/mK)	1.49
Surface emissivity	0.92

ตารางที่ ก-2 แบบอุณหภูมิอบอ่อนและค่าความจุความร้อนของขวดแก้วสีใส

แบบอุณหภูมิในการอบอ่อน	เวลา (s)	อุณหภูมิ (°C)	ความจุความร้อน (J/kgK)
IP	0	550	1238
	155	550	1238
	464	560	1242
	773	550	1238
	1082	520	1227
	1391	465	1204
	1700	319	1123
	2009	173	997
	2164	100	907

ตารางที่ ก-2 แบบอุณหภูมิอบอ่อนและค่าความจุความร้อนของขวดแก้วสีใส (ต่อ)

แบบอุณหภูมิในการอบอ่อน	**เวลา (s)**	**อุณหภูมิ (°C)**	**ความจุความร้อน (J/kgK)**
AGR	0	550	1238
	155	550	1238
	464	550	1238
	773	530	1231
	1082	510	1223
	1391	490	1215
	1700	335	1132
	2009	178	1002
	2164	100	907
DT	0	550	1238
	155	543	1236
	464	530	1231
	773	517	1225
	1082	503	1220
	1391	490	1214
	1700	334	1133
	2009	178	1003
	2164	100	907

ภาคผนวก ข

ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิจากโรงงาน

ตารางที่ ข-1 อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ที่ผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A, B และ C ที่ความหนา 3 มม. จากแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	**อุณหภูมิทีผิวลำตัวด้านนอก (°C)**		
	A	**B**	**C**
0	565.57	560.94	572.45
90	565.03	559.83	570.74
180	563.38	558.15	569.26
270	562.77	557.76	565.38
360	560.95	560.04	562.61
450	562.29	564.65	560.49
541	561.86	563.58	558.34
631	560.45	559.05	555.13
721	558.73	557.38	555.04
811	554.35	552.71	552.88
901	550.94	544.99	548.02
991	537.11	535.84	539.16
1082	525.45	526.55	528.46
1172	512.35	520.58	515.13
1262	501.37	513.47	502.29
1352	485.04	492.85	490.73
1442	472.45	475.11	465.21
1532	455.32	450.88	440.40
1623	402.47	408.46	393.58
1713	358.72	358.37	356.07
1803	304.16	315.27	311.76
1893	254.67	256.92	259.81
1983	212.34	213.33	215.68
2073	168.55	171.32	170.25
2164	126.75	136.76	137.32

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการวิจัย

ตารางที่ ค-1 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านนอก								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	15.57	2.75	550.00	15.57	2.75	550.00	15.57	2.75
90	550.00	15.03	2.66	550.00	15.03	2.66	550.00	15.03	2.66
180	551.05	12.3	2.19	551.03	12.35	2.19	551.03	12.35	2.19
270	553.32	9.45	1.68	553.27	9.50	1.69	553.25	9.52	1.69
360	555.46	5.49	0.98	555.41	5.54	0.99	555.38	5.57	0.99
450	557.58	4.71	0.84	557.53	4.76	0.85	557.51	4.78	0.85
541	557.26	4.60	0.82	557.23	4.63	0.82	557.22	4.64	0.83
631	554.75	5.70	1.02	554.77	5.68	1.01	554.77	5.68	1.01
721	551.71	7.02	1.26	551.76	6.97	1.25	551.79	6.94	1.24
811	545.04	9.31	1.68	545.14	9.21	1.66	545.19	9.16	1.65
901	538.37	12.57	2.28	538.52	12.42	2.25	538.60	12.34	2.24
991	528.97	8.14	1.52	529.17	7.94	1.48	529.27	7.84	1.46
1082	518.56	6.89	1.31	518.80	6.65	1.27	518.92	6.53	1.24
1172	507.24	5.11	1.00	507.53	4.82	0.94	507.69	4.66	0.91
1262	492.73	8.30	1.66	493.10	7.93	1.58	493.30	7.73	1.54
2352	476.20	8.84	1.82	476.66	8.38	1.73	476.92	8.12	1.67
1442	447.87	24.58	5.20	448.58	13.87	2.94	448.97	23.48	4.97
1532	410.65	44.67	9.81	441.72	33.60	7.38	412.30	43.02	9.45
1623	369.24	33.23	8.26	370.61	31.86	7.92	371.38	31.09	7.72
1713	327.31	31.41	8.76	328.80	29.92	8.34	329.67	29.05	8.10
1803	283.67	20.49	6.74	285.22	18.94	6.23	286.15	18.01	5.92
1893	241.12	13.55	5.32	242.69	11.98	4.70	243.62	11.05	4.34
1983	199.01	13.33	6.28	200.53	11.81	5.56	201.44	10.90	5.13
2073	159.34	9.21	5.46	160.08	8.47	5.03	161.68	6.87	4.08
2164	119.67	7.08	5.59	121.07	5.68	4.48	121.91	4.84	3.82

ตารางที่ ค-2 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านใน								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	15.57	2.75	550.00	15.57	2.75	550.00	15.57	2.75
90	550.00	15.03	2.66	550.00	15.03	2.66	550.00	15.03	2.66
180	551.05	12.33	2.19	551.03	12.35	2.19	551.02	12.36	2.19
270	553.32	9.45	1.68	553.27	9.50	1.69	553.23	9.54	1.70
360	555.45	5.50	0.98	555.40	5.55	0.99	555.36	5.59	1.00
450	557.58	4.71	0.84	557.53	4.76	0.85	557.49	4.80	0.85
541	557.26	4.60	0.82	557.23	4.63	0.82	557.21	4.65	0.83
631	554.75	5.70	1.02	554.77	5.68	1.01	554.78	5.67	1.01
721	551.71	7.02	1.26	551.77	6.96	1.25	551.81	6.92	1.24
811	545.05	9.30	1.68	545.15	9.20	1.66	545.23	9.12	1.65
901	538.38	12.56	2.28	538.53	12.41	2.25	538.64	12.30	2.23
991	528.99	8.12	1.51	529.18	7.93	1.48	529.32	7.79	1.45
1082	518.57	6.88	1.31	518.81	6.64	1.26	518.99	6.46	0.90
1172	507.26	5.09	0.99	507.55	4.80	0.94	507.76	7.64	1.52
1262	492.75	8.28	1.65	493.12	7.91	1.48	493.39	8.01	1.65
2352	476.23	8.81	1.82	476.69	6.64	1.26	477.03	23.33	4.94
1442	447.91	24.54	5.19	448.62	28.35	5.04	449.12	42.80	9.40
1532	410.71	44.61	9.80	441.78	33.54	7.37	412.52	30.84	7.66
1623	369.31	33.16	8.24	370.69	31.78	7.70	371.63	28.72	8.01
1713	327.40	31.32	8.73	328.88	29.84	8.32	330.00	17.83	5.86
1803	283.74	20.42	6.71	285.29	18.87	6.20	286.33	10.88	4.27
1893	241.19	13.48	5.29	242.76	11.91	4.68	243.79	10.75	5.06
1983	199.07	13.27	6.25	200.59	11.75	5.53	201.59	10.75	5.06
2073	159.39	9.16	5.43	160.86	7.69	4.56	161.80	6.75	4.00
2164	119.72	7.03	5.55	121.13	5.62	4.43	122.03	4.72	3.72

ตารางที่ ค-3 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านนอก								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	10.94	1.95	550.00	10.94	1.95	550.00	10.94	1.95
90	550.00	9.83	1.76	550.00	9.83	1.76	550.00	9.83	1.76
180	551.03	7.12	1.28	551.03	7.12	1.28	551.03	7.12	1.28
270	553.25	4.51	0.81	553.27	4.49	0.81	553.25	4.51	0.81
360	555.38	4.66	0.83	555.41	4.63	0.83	555.38	4.66	0.83
450	557.51	7.14	1.26	557.52	7.13	1.26	557.51	7.14	1.26
541	557.22	6.36	1.13	557.53	6.05	1.07	557.22	6.36	1.13
631	554.77	4.28	0.77	554.77	4.28	0.77	554.77	4.28	0.77
721	551.80	5.58	1.00	551.77	5.61	1.01	551.79	5.59	1.00
811	545.20	7.51	1.36	545.14	7.57	1.37	545.20	7.51	1.36
901	538.60	6.39	1.17	538.52	6.47	1.19	538.60	6.39	1.17
991	529.27	6.57	1.23	529.16	6.68	1.25	529.27	6.57	1.23
1082	518.92	7.63	1.45	518.80	7.75	1.47	518.93	7.62	1.45
1172	507.68	12.90	2.48	507.53	13.05	2.51	507.69	12.89	2.48
1262	493.29	20.18	3.93	493.10	20.37	3.97	493.30	20.17	3.93
1352	476.90	15.95	3.24	476.66	16.19	3.28	478.97	13.88	2.82
1442	448.93	26.18	5.51	448.58	26.53	5.58	448.97	26.14	5.50
1532	412.23	38.65	8.57	411.72	39.16	8.69	412.31	38.57	8.55
1623	371.39	37.07	9.08	370.74	37.72	9.23	371.50	36.96	9.05
1713	330.00	28.37	7.92	329.31	29.06	8.11	330.17	28.20	7.87
1803	286.08	29.19	9.26	285.40	29.87	9.47	286.33	28.94	9.18
1893	243.60	13.32	5.18	242.92	14.00	5.45	243.87	13.05	5.08
1983	200.81	12.52	5.87	200.14	13.19	6.18	201.09	12.24	5.74
2073	165.55	5.77	3.37	165.00	6.32	3.69	165.81	5.51	3.22
2164	133.18	3.58	2.62	132.65	4.11	3.01	133.42	3.34	2.44

ตารางที่ ค-4 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านใน								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	10.94	1.95	550.00	10.94	1.95	550.00	10.94	1.95
90	550.00	9.83	1.76	550.00	9.83	1.76	550.00	9.83	1.76
180	551.03	7.12	1.28	551.03	7.12	1.28	551.02	7.13	1.28
270	553.25	4.51	0.81	553.27	4.49	0.81	553.23	4.53	0.81
360	555.39	4.65	0.83	555.41	4.63	0.83	555.36	4.68	0.84
450	557.51	7.14	1.26	557.53	7.12	1.26	557.49	7.16	1.27
541	557.22	6.36	1.13	557.23	6.35	1.13	557.21	6.37	1.13
631	554.77	4.28	0.77	554.77	4.28	0.77	554.78	4.27	0.76
721	551.80	5.58	1.00	551.77	5.61	1.01	551.81	5.57	1.00
811	545.18	7.53	1.36	545.15	7.56	1.37	545.23	7.48	1.35
901	538.58	6.41	1.18	538.53	6.46	1.19	538.64	6.35	1.17
991	529.25	6.59	1.23	529.18	6.66	1.24	529.32	6.52	1.22
1082	518.90	7.65	1.45	518.81	7.74	1.47	518.99	7.56	1.44
1172	507.65	12.93	2.48	507.55	13.03	2.50	507.76	12.82	2.46
1262	493.25	20.22	3.94	493.12	20.35	3.96	493.39	20.08	3.91
1352	476.85	16.00	3.25	476.69	16.16	3.28	477.03	15.52	3.21
1442	448.86	26.25	5.53	448.62	26.49	5.58	449.12	25.99	5.47
1532	412.13	38.75	8.59	411.78	39.10	8.67	412.52	38.36	8.51
1623	371.27	37.19	9.10	370.82	37.64	9.22	371.77	36.69	8.98
1713	329.89	28.48	7.95	329.39	28.98	8.09	330.41	27.96	7.80
1803	285.98	29.29	9.29	285.47	29.80	9.45	286.51	28.76	9.12
1893	243.50	13.42	5.22	242.99	13.93	5.42	244.04	12.88	5.01
1983	200.71	12.62	5.92	200.21	13.12	6.15	201.23	12.10	5.67
2073	165.46	5.86	3.42	165.01	6.31	3.68	165.93	5.39	3.15
2164	133.11	3.65	2.67	132.71	4.05	2.96	133.52	3.24	2.37

ตารางที่ ค-5 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านนอกของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านนอก								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	22.45	3.92	550.00	22.45	3.92	550.00	22.45	3.92
90	550.00	20.74	3.63	550.00	20.74	3.63	550.00	20.74	3.63
180	551.02	18.24	3.20	551.03	18.23	3.20	551.03	18.23	3.20
270	553.24	12.14	2.15	553.27	12.11	2.14	553.25	12.13	2.15
360	555.38	7.23	1.29	555.41	7.20	1.28	555.38	7.23	1.29
450	557.50	2.99	0.53	557.53	2.96	0.53	557.51	2.98	0.53
541	557.22	1.12	0.20	557.23	1.11	0.20	557.22	1.12	0.20
631	554.77	0.40	0.07	554.77	0.40	0.07	554.77	0.40	0.07
721	551.80	3.24	0.58	551.77	3.27	0.59	551.80	3.24	0.58
811	545.20	7.68	1.39	545.14	7.74	1.40	545.19	7.69	1.39
901	538.61	9.41	1.72	538.52	9.50	1.73	538.60	9.42	1.72
991	529.29	9.87	1.83	529.17	9.99	1.85	529.27	9.89	1.83
1082	518.94	9.52	1.80	518.80	9.66	1.83	518.92	9.54	1.81
1172	507.71	7.42	1.44	507.53	7.60	1.48	507.69	7.44	1.44
1262	493.33	6.96	1.39	493.10	7.19	1.44	493.31	6.98	1.40
1352	476.96	9.77	2.01	476.66	10.07	2.07	476.92	9.81	2.02
1442	449.02	16.19	3.48	448.58	16.63	3.57	448.96	16.25	3.49
1532	412.38	28.02	6.36	411.71	28.69	6.51	412.30	28.10	6.38
1623	371.59	21.99	5.59	370.74	22.84	5.80	371.51	22.07	5.61
1713	330.25	25.82	7.25	329.31	26.76	7.52	330.15	25.92	7.28
1803	286.38	25.38	8.14	285.40	26.36	8.46	286.32	25.44	8.16
1893	243.92	15.89	6.12	242.92	16.89	6.50	243.85	15.96	6.14
1983	201.12	14.56	6.75	200.15	15.53	7.20	201.08	14.60	6.77
2073	165.85	4.40	2.58	164.95	5.30	3.11	165.80	4.45	2.61
2164	134.45	2.87	2.09	132.65	4.67	3.40	133.42	3.90	2.84

ตารางที่ ค-6 การกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

Time (s)	อุณหภูมิ (°C)								
	ผิวด้านใน								
	ไหล่	|Δ|(°C)	% error	ลำตัว	|Δ|(°C)	% error	มุมก้น	|Δ|(°C)	% error
0	550.00	22.45	3.92	550.00	22.45	3.92	550.00	22.45	3.92
90	550.00	20.74	3.63	550.00	20.74	3.63	550.00	20.74	3.63
180	551.02	18.24	3.20	551.03	18.24	3.20	551.02	18.24	3.20
270	553.24	12.14	2.15	553.27	12.15	2.15	553.23	12.15	2.15
360	555.37	7.24	1.29	555.40	7.25	1.29	555.36	7.25	1.29
450	557.49	3.00	0.54	557.53	3.01	0.54	557.48	3.01	0.54
541	557.21	1.13	0.20	557.23	1.12	0.20	557.22	1.12	0.20
631	554.78	0.39	0.07	554.77	0.39	0.07	554.78	0.39	0.07
721	551.81	3.23	0.58	551.77	3.22	0.58	551.82	3.22	0.58
811	545.23	7.65	1.38	545.15	7.64	1.38	545.24	7.64	1.38
901	538.64	9.38	1.71	538.53	9.36	1.71	538.66	9.36	1.71
991	529.32	9.84	1.83	529.18	9.82	1.82	529.34	9.82	1.82
1082	518.99	9.47	1.79	518.81	9.46	1.79	519.00	9.46	1.79
1172	507.76	7.37	1.43	507.55	7.34	1.42	507.79	7.34	1.42
1262	493.39	6.90	1.38	493.12	6.86	1.37	493.43	6.86	1.37
1352	477.03	9.70	1.99	476.69	9.66	1.98	477.07	9.66	1.98
1442	449.13	16.08	3.46	448.62	16.02	3.44	449.19	16.02	3.44
1532	412.54	27.86	6.33	411.78	27.78	6.31	412.62	27.78	6.31
1623	371.79	21.79	5.54	370.82	21.69	5.51	371.89	21.69	5.51
1713	330.45	25.62	7.20	329.39	25.53	7.17	330.54	25.53	7.17
1803	286.57	25.19	8.08	285.47	25.13	8.06	286.63	25.13	8.06
1893	244.10	15.71	6.05	242.99	15.66	6.03	244.15	15.66	6.03
1983	201.30	14.38	6.67	200.21	14.34	6.65	201.34	14.34	6.65
2073	166.00	4.25	2.50	165.01	4.22	2.48	166.03	4.22	2.48
2164	133.58	3.74	2.72	132.70	4.62	3.36	133.60	3.72	2.71

ตารางที่ ค-7 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
270	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
360	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
450	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
541	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
631	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
721	0.05	0.02	0.04	0.02	0.02	0.10
811	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
901	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	0.19
991	0.08	0.10	0.10	0.08	0.09	0.25
1082	0.10	0.12	0.12	0.10	0.11	0.32
1172	0.12	0.15	0.15	0.12	0.12	0.39
1262	0.18	0.18	0.19	0.16	0.17	0.48
2352	0.21	0.23	0.25	0.20	0.26	0.60
1442	0.32	0.30	0.30	0.35	0.30	0.80
1532	0.38	0.33	0.35	0.38	0.39	1.05
1623	0.40	0.45	0.45	0.47	0.50	1.40
1713	0.36	0.59	0.57	0.51	0.52	1.68
1803	0.35	0.57	0.55	0.50	0.50	1.63
1893	0.34	0.53	0.50	0.47	0.47	1.60
1983	0.32	0.47	0.42	0.41	0.40	1.50
2073	0.31	0.43	0.40	0.40	0.37	1.40
2164	0.25	0.38	0.35	0.36	0.33	1.32

ตารางที่ ค-8 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
270	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
360	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
450	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10
541	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
631	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
721	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.10
811	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.15
901	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.19
991	0.09	0.10	0.10	0.09	0.07	0.25
1082	0.10	0.12	0.12	0.10	0.10	0.30
1172	0.12	0.15	0.15	0.12	0.11	0.39
1262	0.17	0.19	0.19	0.16	0.13	0.48
1352	0.20	0.23	0.24	0.20	0.16	0.60
1442	0.30	0.30	0.32	0.26	0.20	0.80
1532	0.38	0.46	0.35	0.32	0.30	1.20
1623	0.40	0.57	0.46	0.38	0.40	1.60
1713	0.54	0.60	0.59	0.50	0.52	1.69
1803	0.53	0.58	0.57	0.48	0.50	1.63
1893	0.52	0.54	0.50	0.44	0.47	1.60
1983	0.48	0.48	0.45	0.39	0.42	1.42
2073	0.40	0.41	0.39	0.34	0.36	1.35
2164	0.34	0.37	0.32	0.39	0.28	1.25

ตารางที่ ค-9 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ IP

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
270	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
360	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
450	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
541	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
631	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
721	0.05	0.02	0.03	0.03	0.02	0.09
811	0.07	0.05	0.06	0.05	0.04	0.15
901	0.10	0.08	0.09	0.06	0.07	0.20
991	0.14	0.10	0.10	0.09	0.07	0.30
1082	0.18	0.12	0.12	0.10	0.10	0.36
1172	0.20	0.15	0.15	0.12	0.11	0.40
1262	0.25	0.19	0.19	0.15	0.12	0.55
1352	0.31	0.24	0.23	0.20	0.17	0.65
1442	0.48	0.32	0.32	0.25	0.20	1.00
1532	0.64	0.45	0.45	0.35	0.30	1.32
1623	0.80	0.58	0.56	0.42	0.40	1.80
1713	0.86	0.69	0.58	0.45	0.52	1.92
1803	0.79	0.53	0.56	0.45	0.49	1.90
1893	0.70	0.49	0.50	0.36	0.45	1.70
1983	0.65	0.47	0.42	0.33	0.43	1.60
2073	0.60	0.40	0.38	0.29	0.37	150
2164	0.54	0.36	0.32	0.24	0.31	1.39

ตารางที่ ค-10 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
541	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
631	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
721	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.16
811	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.17
901	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.18
991	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.19
1082	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1172	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1262	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1352	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1442	0.20	0.19	0.20	0.06	0.17	0.44
1532	0.32	0.29	0.30	0.23	0.26	0.72
1623	0.37	0.45	0.46	0.39	0.40	1.18
1713	0.37	0.54	0.53	0.45	0.47	1.45
1803	0.35	0.55	0.53	0.46	0.46	1.57
1893	0.34	0.53	0.50	0.45	0.45	1.59
1983	0.31	0.50	0.46	0.42	0.42	1.59
2073	0.30	0.48	0.42	0.39	0.41	1.58
2164	0.25	0.38	0.35	0.35	0.33	1.32

ตารางที่ ค-11 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
541	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
631	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
721	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.16
811	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.17
901	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.18
991	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.19
1082	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1172	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1262	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1352	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1442	0.20	0.20	0.20	0.15	0.17	0.42
1532	0.25	0.29	0.30	0.25	0.26	0.72
1623	0.40	0.45	0.46	0.39	0.40	1.18
1713	0.49	0.54	0.53	0.45	0.47	1.45
1803	0.50	0.55	0.53	0.45	0.48	1.57
1893	0.49	0.53	0.50	0.43	0.46	1.59
1983	0.46	0.50	0.46	0.40	0.42	1.59
2073	0.45	0.48	0.42	0.38	0.41	1.58
2164	0.36	0.39	0.34	0.30	0.33	1.32

ตารางที่ ค-12 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ AGR

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
450	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
541	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
631	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
721	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.16
811	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.17
901	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.18
991	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.19
1082	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1172	0.11	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1262	0.11	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1352	0.11	0.06	0.06	0.06	0.06	0.20
1442	0.22	0.20	0.20	0.15	0.17	0.42
1532	0.40	0.29	0.30	0.23	0.26	0.76
1623	0.63	0.45	0.46	0.35	0.40	1.32
1713	0.77	0.54	0.53	0.40	0.47	1.65
1803	0.79	0.55	0.53	0.40	0.48	1.78
1893	0.78	0.53	0.50	0.39	0.46	1.80
1983	0.73	0.50	0.45	0.34	0.42	1.80
2073	0.70	0.48	0.42	0.32	0.41	1.77
2164	0.59	0.39	0.33	0.25	0.33	1.51

ตารางที่ ค–13 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
180	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
270	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
360	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
450	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
541	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
631	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
721	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
811	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
901	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
991	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
1082	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
1172	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
1262	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
1352	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10
1442	0.05	0.05	0.07	0.05	0.10	0.40
1532	0.09	0.10	0.10	0.10	0.16	0.59
1623	0.13	0.18	0.19	0.16	0.25	0.92
1713	0.15	0.20	0.20	0.18	0.29	1.10
1803	0.14	0.20	0.20	0.18	0.29	1.13
1893	0.13	0.20	0.20	0.18	0.28	1.10
1983	0.12	0.18	0.18	0.16	0.26	1.00
2073	0.11	0.17	0.17	0.15	0.25	0.98
2164	0.10	0.15	0.15	0.13	0.20	0.80

ตารางที่ ค–14 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
180	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
270	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
360	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
450	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
541	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
631	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
721	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
811	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
901	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
991	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
1082	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
1172	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
1262	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12
1352	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.12
1442	0.06	0.05	0.15	0.12	0.15	0.25
1532	0.16	0.10	0.23	0.20	0.25	0.60
1623	0.25	0.18	0.30	0.23	0.28	0.90
1713	0.28	0.20	0.30	0.23	0.29	1.18
1803	0.29	0.20	0.30	0.22	0.28	1.20
1893	0.28	0.20	0.29	0.21	0.27	1.18
1983	0.26	0.19	0.28	0.20	0.26	1.10
2073	0.25	0.18	0.27	0.19	0.25	1.00
2164	0.20	0.15	0.20	0.15	0.20	0.80

ตารางที่ ค–15 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 2 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
180	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
270	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
360	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
450	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
541	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
631	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
721	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
811	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
901	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
991	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
1082	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
1172	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
1262	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
1352	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.12
1442	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.25
1532	0.13	0.12	0.15	0.17	0.10	0.45
1623	0.15	0.18	0.23	0.27	0.16	0.65
1713	0.15	0.20	0.26	0.32	0.18	0.70
1803	0.15	0.20	0.30	0.33	0.18	0.80
1893	0.15	0.20	0.30	0.33	0.17	0.80
1983	0.14	0.18	0.30	0.32	0.16	0.80
2073	0.13	0.17	0.31	0.29	0.15	0.82
2164	0.12	0.15	0.25	0.24	0.13	0.75

ตารางที่ ค–16 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
180	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
270	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
360	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
450	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
541	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
631	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
721	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
811	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
901	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
991	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1082	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1172	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1262	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1352	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1442	0.20	0.19	0.20	0.06	0.17	0.44
1532	0.32	0.29	0.30	0.23	0.26	0.72
1623	0.37	0.45	0.46	0.39	0.40	1.18
1713	0.37	0.54	0.53	0.45	0.47	1.45
1803	0.35	0.55	0.53	0.46	0.46	1.57
1893	0.34	0.53	0.50	0.45	0.45	1.59
1983	0.31	0.50	0.46	0.42	0.42	1.59
2073	0.30	0.48	0.42	0.39	0.41	1.58
2164	0.25	0.38	0.35	0.35	0.33	1.32

ตารางที่ ค–17 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิDT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
180	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
270	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
360	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
450	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
541	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
631	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
721	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
811	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
901	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
991	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1082	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1172	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1262	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1352	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1442	0.20	0.20	0.20	0.15	0.17	0.42
1532	0.25	0.29	0.30	0.25	0.26	0.72
1623	0.40	0.45	0.46	0.39	0.40	1.18
1713	0.49	0.54	0.53	0.45	0.47	1.45
1803	0.50	0.55	0.53	0.45	0.48	1.57
1893	0.49	0.53	0.50	0.43	0.46	1.59
1983	0.46	0.50	0.46	0.40	0.42	1.59
2073	0.45	0.48	0.42	0.38	0.41	1.58
2164	0.36	0.39	0.34	0.30	0.33	1.32

ตารางที่ ค–18 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
180	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
270	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
360	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
450	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
541	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
631	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
721	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
811	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
901	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
991	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1082	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1172	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1262	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1352	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12
1442	0.22	0.20	0.20	0.15	0.17	0.42
1532	0.40	0.29	0.30	0.23	0.26	0.76
1623	0.63	0.45	0.46	0.35	0.40	1.32
1713	0.77	0.54	0.53	0.40	0.47	1.65
1803	0.79	0.55	0.53	0.40	0.48	1.78
1893	0.78	0.53	0.50	0.39	0.46	1.80
1983	0.73	0.50	0.45	0.34	0.42	1.80
2073	0.70	0.48	0.42	0.32	0.41	1.77
2164	0.59	0.39	0.33	0.25	0.33	1.48

ตารางที่ ค-19 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Aที่ความหนา 4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
180	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
270	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
360	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
450	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
541	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
631	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
721	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
811	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
901	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
991	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
1082	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
1172	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
1262	0.07	0.10	0.12	0.08	0.08	0.17
1352	0.07	0.10	0.12	0.08	0.20	0.17
1442	0.20	0.50	0.30	0.20	0.43	0.80
1532	0.35	0.80	0.58	0.39	0.70	0.58
1623	0.36	0.98	0.92	0.63	0.84	1.35
1713	0.67	1.00	1.10	0.77	0.88	1.70
1803	0.68	0.99	1.15	0.80	0.86	1.82
1893	0.66	0.95	1.10	0.79	0.83	1.82
1983	0.60	0.90	1.00	0.76	0.77	1.80
2073	0.59	0.85	0.98	0.75	0.75	1.76
2164	0.48	0.75	0.80	0.62	0.62	1.50

ตารางที่ ค–20 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ความหนา 4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
180	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
270	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
360	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
450	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
541	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
631	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
721	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
811	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
901	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
991	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
1082	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
1172	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
1262	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.20
1352	0.07	0.10	0.12	0.09	0.09	0.50
1442	0.10	0.30	0.40	0.30	0.23	0.80
1532	0.35	0.50	0.60	0.44	0.42	1.55
1623	0.57	0.80	0.98	0.71	0.70	1.18
1713	0.67	0.98	1.16	0.88	0.85	1.98
1803	0.70	1.00	1.19	0.91	0.87	2.10
1893	0.67	0.99	1.17	0.90	0.85	2.10
1983	0.64	0.93	1.14	0.86	0.80	2.08
2073	0.61	0.90	1.11	0.82	0.77	2.05
2164	0.50	0.75	0.82	0.70	0.65	1.75

ตารางที่ ค–21 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Cที่ความหนา 4 มม. ของแบบ อุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
180	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
270	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
360	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
450	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
541	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
631	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
721	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
811	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
901	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
991	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
1082	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
1172	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
1262	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
1352	0.12	0.10	0.12	0.07	0.08	0.30
1442	0.30	0.20	0.30	0.15	0.20	0.75
1532	0.55	0.50	0.60	0.30	0.43	1.25
1623	0.90	0.80	0.98	0.50	0.70	2.10
1713	1.12	0.98	1.15	0.59	0.84	2.75
1803	1.15	1.10	1.17	0.60	0.87	2.80
1893	1.14	0.99	1.16	0.58	0.84	2.85
1983	1.10	0.92	1.05	0.54	0.80	2.80
2073	1.00	0.90	0.99	0.52	0.76	2.70
2164	0.89	0.75	0.80	0.42	0.63	2.50

ตารางที่ ค–22 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 1-1-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.18
180	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.21
270	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.22
360	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
450	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
541	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
631	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
721	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
811	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
901	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
991	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
1082	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
1172	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
1262	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
1352	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.24
1442	0.03	0.02	1.70	0.04	0.02	1.23
1532	0.03	0.03	0.60	0.04	0.03	2.21
1623	0.03	0.03	2.11	0.04	0.04	2.87
1713	0.03	0.03	2.25	0.04	0.04	3.20
1803	0.03	0.03	2.28	0.04	0.03	3.35
1893	0.03	0.03	2.32	0.04	0.03	3.50
1983	0.03	0.03	2.29	0.04	0.03	3.53
2073	0.02	0.03	2.26	0.04	0.03	3.55
2164	0.02	0.02	1.89	0.03	0.02	3.06

ตารางที่ ค–23 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ความหนา 1-1-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.01	0.00	0.17	0.00	0.00	0.20
180	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.23
270	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.22
360	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
450	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
541	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
631	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
721	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
811	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.24
901	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.25
991	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.25
1082	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.25
1172	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.25
1262	0.01	0.00	0.18	0.00	0.00	0.25
1352	0.01	0.02	0.18	0.03	0.00	0.25
1442	0.07	0.03	1.73	0.04	0.02	1.29
1532	0.12	0.03	2.15	0.05	0.03	2.30
1623	0.14	0.03	2.30	0.05	0.04	3.00
1713	0.14	0.03	2.30	0.05	0.04	3.34
1803	0.14	0.03	2.33	0.05	0.03	3.50
1893	0.14	0.03	2.36	0.05	0.03	3.63
1983	0.13	0.03	2.33	0.05	0.03	3.67
2073	0.13	0.03	2.30	0.04	0.03	3.96
2164	0.10	0.02	1.92	0.04	0.02	3.18

ตารางที่ ค-24 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 1-1-4มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.16	0.02	0.00	0.16
180	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.19
270	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.20
360	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.21
450	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.21
541	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.22
631	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.22
721	0.00	0.00	0.18	0.02	0.00	0.22
811	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.22
901	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.23
991	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.23
1082	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.23
1172	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.23
1262	0.00	0.00	0.19	0.02	0.00	0.23
1352	0.00	0.00	0.19	0.12	0.00	0.23
1442	0.02	0.00	1.78	0.19	0.00	0.23
1532	0.04	0.00	2.21	0.22	0.00	1.14
1623	0.05	0.00	2.37	0.23	0.00	2.08
1713	0.06	0.00	2.40	0.23	0.00	2.76
1803	0.06	0.00	2.40	0.23	0.00	3.12
1893	0.07	0.00	2.44	0.22	0.00	3.29
1983	0.07	0.00	2.42	0.22	0.00	3.50
2073	0.07	0.00	2.38	0.22	0.00	3.56
2164	0.06	0.00	2.00	0.17	0.00	3.09

ตารางที่ ค–25 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.01	0.02	0.16	0.02	0.02	0.14
180	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
270	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
360	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
450	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
541	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
631	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
721	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
811	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
901	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
991	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
1082	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
1172	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
1262	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
1352	0.01	0.02	0.18	0.02	0.02	0.14
1442	0.08	0.11	0.95	0.01	0.10	0.68
1532	0.12	0.18	1.59	0.15	0.16	1.26
1623	0.13	0.21	2.00	0.18	0.18	1.71
1713	0.13	0.21	2.13	0.18	0.18	1.97
1803	0.13	0.20	2.15	0.18	0.18	2.10
1893	0.12	0.20	2.18	0.18	0.17	2.22
1983	0.12	0.19	2.16	0.17	0.16	2.27
2073	0.11	0.18	2.13	0.17	0.16	2.31
2164	0.08	0.14	1.78	0.13	0.12	2.04

ตารางที่ ค–26 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ Bที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิDT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.04	0.02	0.17	0.02	0.02	0.15
180	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
270	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
360	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
450	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
541	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
631	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
721	0.04	0.02	0.18	0.02	0.02	0.15
811	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
901	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
991	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
1082	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
1172	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
1262	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
1352	0.04	0.02	0.19	0.02	0.02	0.15
1442	0.20	0.11	0.97	0.11	0.10	0.74
1532	0.32	0.17	1.64	0.18	0.16	1.36
1623	0.38	0.20	2.04	0.20	0.18	1.84
1713	0.39	0.20	2.19	0.19	0.18	2.12
1803	0.37	0.19	2.22	0.18	0.17	2.25
1893	0.37	0.19	2.25	0.17	0.17	2.38
1983	0.36	0.18	2.22	0.16	0.16	2.43
2073	0.35	0.17	2.19	0.15	0.16	2.46
2164	0.27	0.14	1.84	0.12	0.12	2.18

ตารางที่ ค–27 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 2-2-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.02	0.02	0.16	0.01	0.02	0.06
180	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
270	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
360	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
450	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
541	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
631	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
721	0.02	0.02	0.17	0.01	0.02	0.09
811	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
901	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
991	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
1082	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
1172	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
1262	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
1352	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.09
1442	0.14	0.11	0.94	0.07	0.10	0.52
1532	0.22	0.17	1.58	0.10	0.16	1.00
1623	0.27	0.20	1.97	0.11	0.18	1.42
1713	0.27	0.20	2.11	0.09	0.18	1.69
1803	0.28	0.19	2.13	0.08	0.17	1.84
1893	0.27	0.19	2.15	0.07	0.17	2.00
1983	0.27	0.18	2.13	0.07	0.16	2.06
2073	0.26	0.17	2.10	0.06	0.15	2.11
2164	0.21	0.13	1.76	0.04	0.12	1.90

ตารางที่ ค-28 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ A ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	**ความเค้น (MPa)**					
	ผิวด้านนอก			**ผิวด้านใน**		
	ไหล่	**ลำตัว**	**มุมก้น**	**ไหล่**	**ลำตัว**	**มุมก้น**
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
180	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
270	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
360	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
450	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
541	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
631	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
721	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
811	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
901	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
991	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
1082	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
1172	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
1262	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
1352	0.03	0.05	0.14	0.05	0.05	0.02
1442	0.20	0.28	0.75	0.23	0.24	0.11
1532	0.32	0.45	1.25	0.37	0.40	0.20
1623	0.37	0.53	1.54	0.45	0.46	0.30
1713	0.37	0.54	1.63	0.46	0.47	0.40
1803	0.35	0.53	1.63	0.45	0.46	0.45
1893	0.34	0.52	1.63	0.45	0.45	0.52
1983	0.32	0.50	1.60	0.44	0.42	0.56
2073	0.31	0.47	1.56	0.42	0.40	0.60
2164	0.24	0.38	1.30	0.35	0.32	0.58

ตารางที่ ค–29 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ B ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
180	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
270	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
360	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
450	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
541	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
631	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
721	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
811	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
901	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
991	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
1082	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
1172	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
1262	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
1352	0.05	0.05	0.15	0.05	0.05	0.03
1442	0.26	0.28	0.78	0.24	0.24	0.13
1532	0.42	0.45	1.29	0.38	0.40	0.25
1623	0.50	0.53	1.60	0.44	0.46	0.38
1713	0.51	0.54	1.69	0.45	0.47	0.50
1803	0.50	0.53	1.69	0.43	0.46	0.57
1893	0.49	0.52	1.69	0.42	0.45	0.64
1983	0.47	0.49	1.66	0.41	0.43	0.69
2073	0.45	0.47	1.62	0.38	0.41	0.73
2164	0.36	0.37	1.36	0.30	0.32	0.70

ตารางที่ ค-30 การกระจายตัวของความเค้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์แก้วแบบ C ที่ความหนา 3-3-4 มม. ของแบบอุณหภูมิ DT

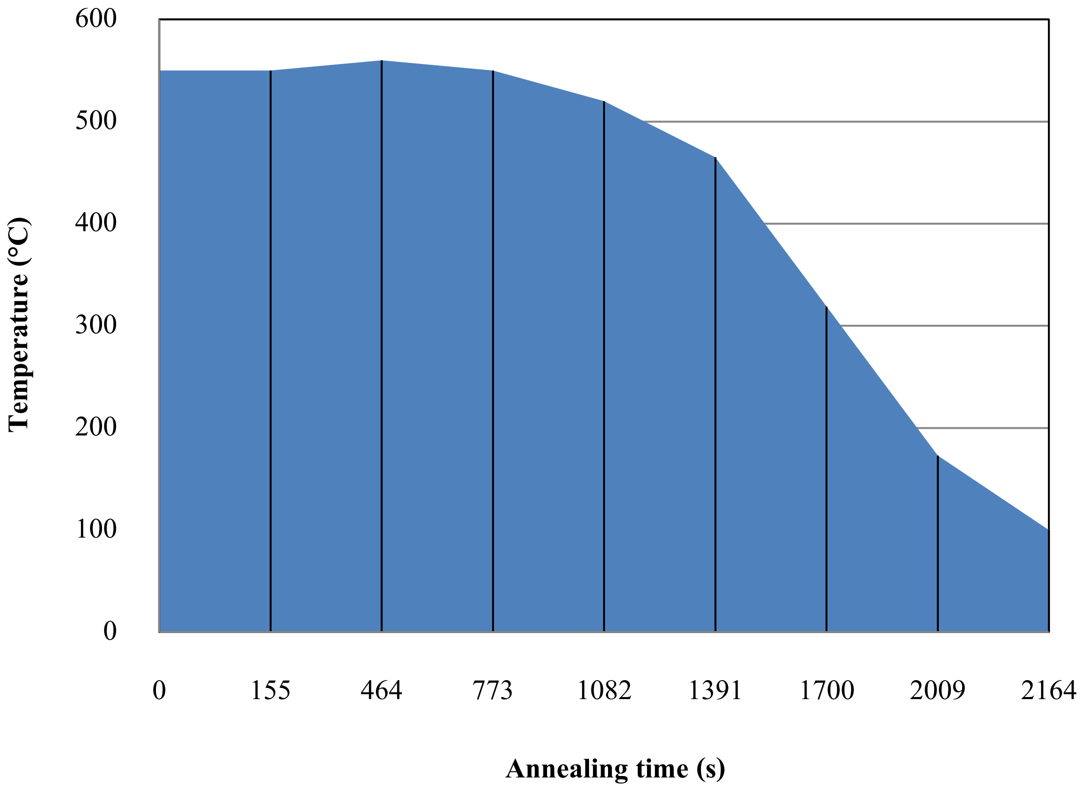
เวลา (s)	ความเค้น (MPa)					
	ผิวด้านนอก			ผิวด้านใน		
	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น	ไหล่	ลำตัว	มุมก้น
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
180	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
270	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
360	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
450	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
541	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
631	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
721	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
811	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
901	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
991	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
1082	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
1172	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
1262	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
1352	0.07	0.05	0.09	0.06	0.05	0.13
1442	0.49	0.32	0.60	0.44	0.31	0.81
1532	0.76	0.49	0.93	0.68	0.48	1.25
1623	0.84	0.54	1.04	0.74	0.53	1.38
1713	0.82	0.53	1.03	0.72	0.51	1.34
1803	0.80	0.51	1.01	0.69	0.50	1.28
1893	0.78	0.50	1.00	0.66	0.48	1.22
1983	0.75	0.47	0.97	0.61	0.45	1.14
2073	0.72	0.45	0.95	0.57	0.43	1.06
2164	0.67	0.42	0.92	0.51	0.39	0.95

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากแบบอุณหภูมิในการอบอ่อน

1. บบอุณหภูมิอบอ่อนIP



รูปที่ ง-1 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน IP

พื้นที่ส่วนที่ 1 = 550 x 155 = 85250

พื้นที่ส่วนที่ 2 = (1/2) x (550 + 560)x (464 - 155) = 171495

พื้นที่ส่วนที่ 3 = (1/2) x (550 + 560) x (773 - 464) = 171495

พื้นที่ส่วนที่ 4 = (1/2) x (550 + 520) x (1082 - 773) = 165315

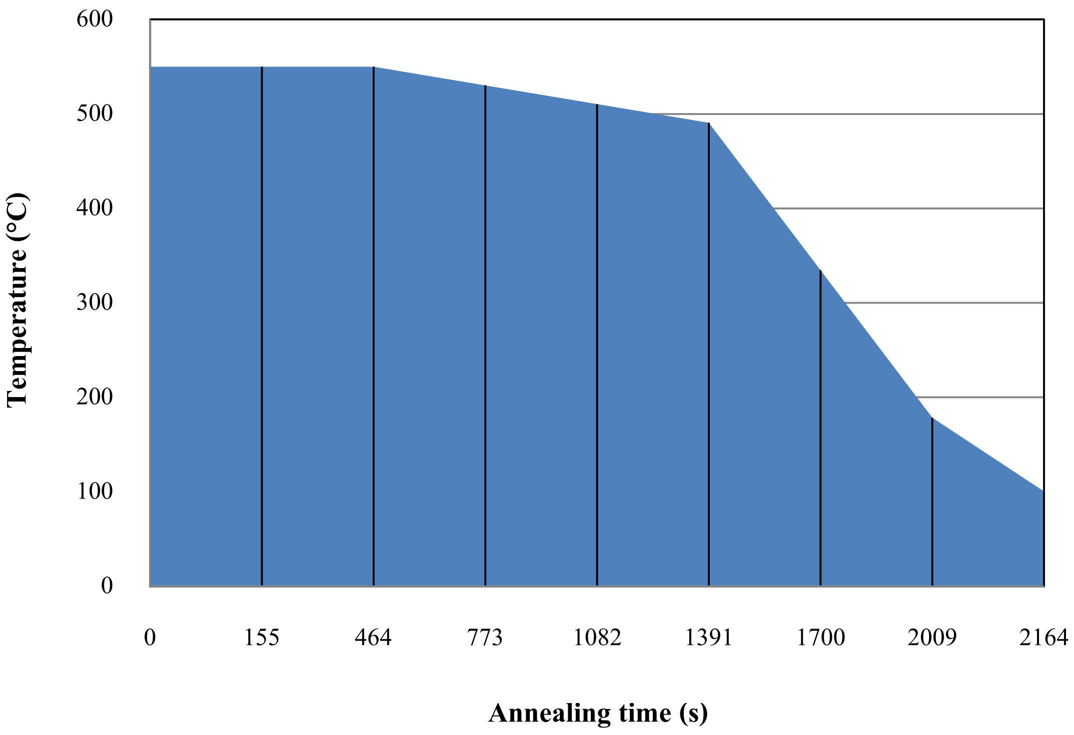
พื้นที่ส่วนที่ 5 = (1/2) x (520 + 465) x (1391 - 1082) = 152183

พื้นที่ส่วนที่ 6 = (1/2) x (465 + 173) x (2009 - 1391) = 197142

พื้นที่ส่วนที่ 7 = (1/2) x (100 + 173) x (2164 - 2009) = 21158

รวมพื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อนIP= 85250 + 171495 + 171495 + 165315 + 152183 + 197142 + 21158 = 964037

2. แบบอุณหภูมิอบอ่อนAGR



รูปที่ ง-2 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR

พื้นที่ส่วนที่ 1 = 550 x 464 = 255200

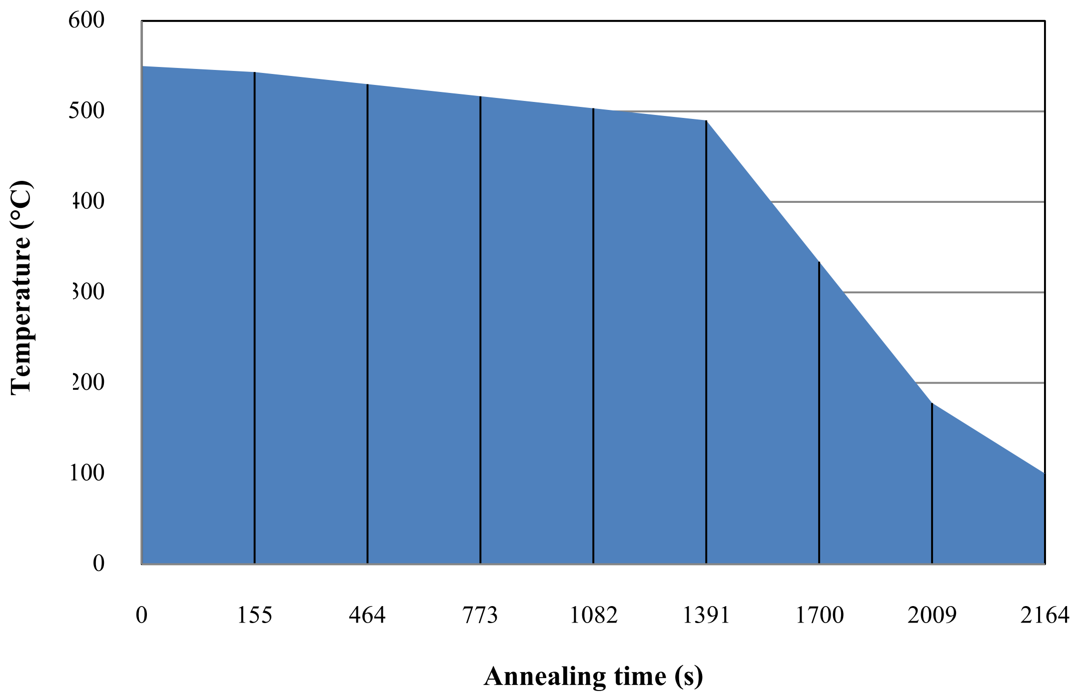
พื้นที่ส่วนที่ 2 = (1/2) x (550 + 490) x (1391 - 464) = 482504

พื้นที่ส่วนที่ 3 = (1/2) x (490 + 178) x (2009 - 1394) = 206721

พื้นที่ส่วนที่ 4 = (1/2) x (100 + 178) x (2164 - 2009) = 21545

รวมพื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR = 255200 + 482504 + 206721 + 21545 = 965197

3. แบบอุณหภูมิอบอ่อนDT



รูปที่ ง-3 พื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน DT

พื้นที่ส่วนที่ 1 = (1/2) x (550 + 490) x 1391 = 723320

พื้นที่ส่วนที่ 2 = (1/2) x (490 + 178) x (2009 - 1391) = 206412

พื้นที่ส่วนที่ 3 = (1/2) x (178 + 100) x (2164 - 2009) = 21545

รวมพื้นที่ใต้กราฟของแบบอุณหภูมิอบอ่อน AGR = 723320 + 206412 + 21545 = 951277

ความแตกต่างพื้นที่ใต้กราฟแบบอุณหภูมิ IP และ DT = 964037 –951277 = 12760 (1.32%)

ความแตกต่างพื้นที่ใต้กราฟแบบอุณหภูมิ AGRและ DT = 965197 – 951277 = 13920 (1.44 %)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววันวิสาข์ เข็มเงิน เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี มีพี่น้องรวม 2 คน เป็นบุตรคนเล็กของครอบครัว สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจากโรงเรียนกรรณสูตศึกษาลัย จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และในปี พ.ศ. 2552 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย