

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะกล่าวถึงลักษณะการเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอน ในด้านแนวรัศมี และตามแนวความยาว และความบริสุทธิ์ของสารทำงาน R113 และ R123 โดยสามารถอธิบายผลการทดสอบได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะการเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอน

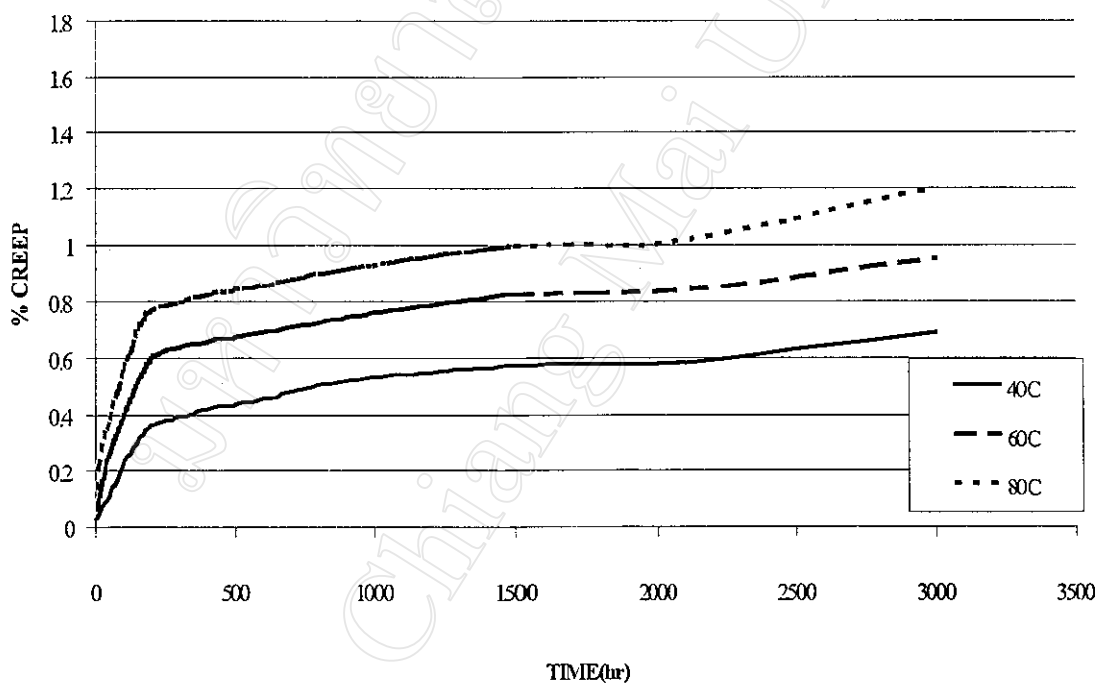
ลักษณะการเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอน จะเป็นผลมาจากหลายปัจจัยเช่น เวลาที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิ ความดันในการทดสอบ ชนิดของคู่สารทำงาน ค่าฟลักซ์ความร้อน วัสดุท่อที่เลือกใช้ และระยะเวลาในการใช้งานเป็นต้น ในการศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้การวัดการคืบของท่อทดสอบโดยหาความยาวที่เปลี่ยนไปเทียบกับความยาวก่อนการทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลจากการวัดแล้วก็นำมาคำนวณหาการคืบออกมาเป็นร้อยละ แล้วนำข้อมูลการคืบที่ได้มาแสดงผลเทียบกับเวลา โดยในการเก็บข้อมูลจะเก็บข้อมูลในช่วงแรกถี่มาก เพราะในการเกิดการคืบของพลาสติกจะมีอัตราการเกิดที่ในช่วงเวลาแรกมากที่สุดแล้วจะค่อยๆลดลงตามเวลา โดยในการทดลองครั้งนี้ได้เก็บข้อมูลทุกๆ 10 ชั่วโมงที่เวลา 0-200 ชั่วโมงของการทดสอบ หลังจากนั้นเก็บข้อมูลทุกๆ 25 ชั่วโมงถึงที่ช่วงเวลา 1500 ชั่วโมงของการทดสอบ และทุกๆ 50 ชั่วโมงจนถึง 3000 ชั่วโมงของการทดสอบ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะรวมการขยายตัวของพลาสติกเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion) ด้วยเพราะในการกำหนดระยะวัดในครั้งแรกกระทำที่อุณหภูมิห้อง แต่ในการเก็บข้อมูลกระทำที่อุณหภูมิทดสอบ ในการเก็บข้อมูลจะแบ่งความละเอียดของไมโครมิเตอร์จาก ± 0.01 มิลลิเมตร ออกเป็น 4 ส่วนเพื่อให้ได้ความละเอียดมากขึ้น (± 0.0025 มิลลิเมตร) และเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณจึงใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้ 1. ใช้ค่าความเค้นและความเครียดในทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain) และถือว่าความดันภายใน และพื้นที่หน้าตัดของท่อทดสอบเท่ากันตลอด 2. ใช้ทฤษฎีผนังบาง (Thin-walled Theory) 3. ถือว่าวัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Viscoelasticity) 4. ถือว่าวัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) คือมีคุณสมบัติ เท่ากันทุกทิศทาง 5. ใช้ทฤษฎีอีลาสติก แต่แทนค่า $E(t)$ ที่ได้จากการทดลอง

ในขณะทำการทดสอบการคืบนั้นได้สังเกตรอยแตกร้าวของผิวท่อไปพร้อมกันด้วยเนื่องจากถ้าท่อทดสอบมีรอยแตกร้าวแล้วสารทำงานที่อยู่ภายในอาจจะระเหยรั่วซึมออกมา หรือท่อทดสอบไม่สามารถทนความดันได้ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการส่งถ่ายความร้อนลดลง หรือไม่สามารถใช้งานต่อไปได้อีก ซึ่งผลจากการสังเกตปรากฏว่าไม่พบรอยแตกร้าวบนผิวท่อทดสอบ และยังมีสารทำงานเหลืออยู่ภายในท่อทดสอบ

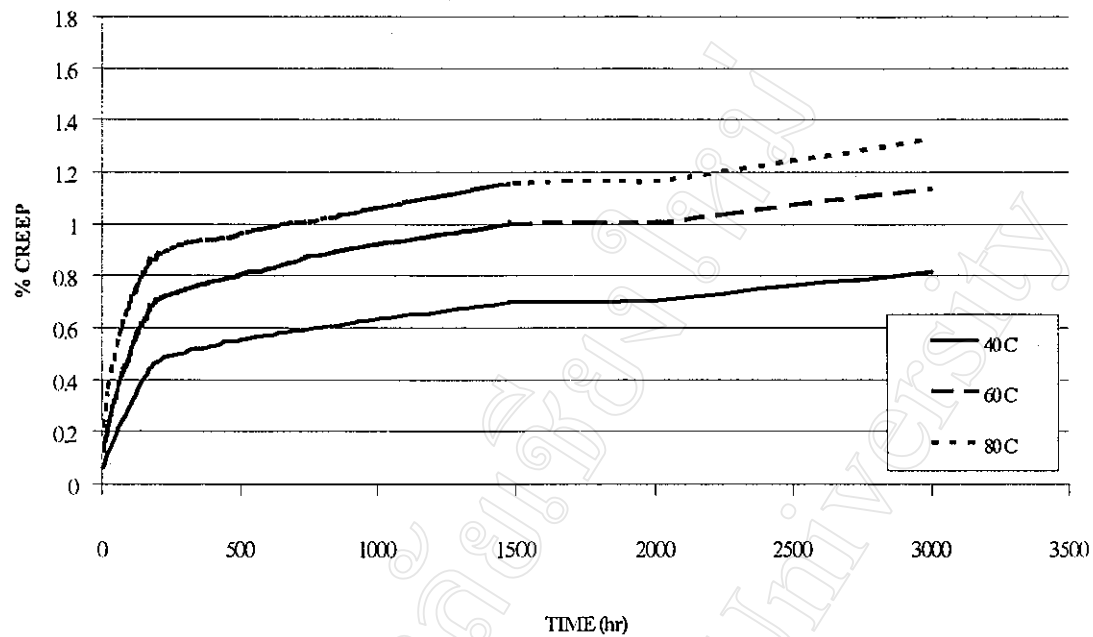
4.1.1 ผลของอุณหภูมิ และความดันที่มีต่อการคืบ

รูป 4.1 ถึง 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละของการคืบ กับ เวลา จากการทดลองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง ผลการทดลองจะพบว่าที่อุณหภูมิ 80°C มีเปอร์เซ็นต์การเกิดการคืบมากที่สุด และจะลดลงที่ 60°C และ 40°C ตามลำดับ ดังตาราง ข-1 ถึง ข-4

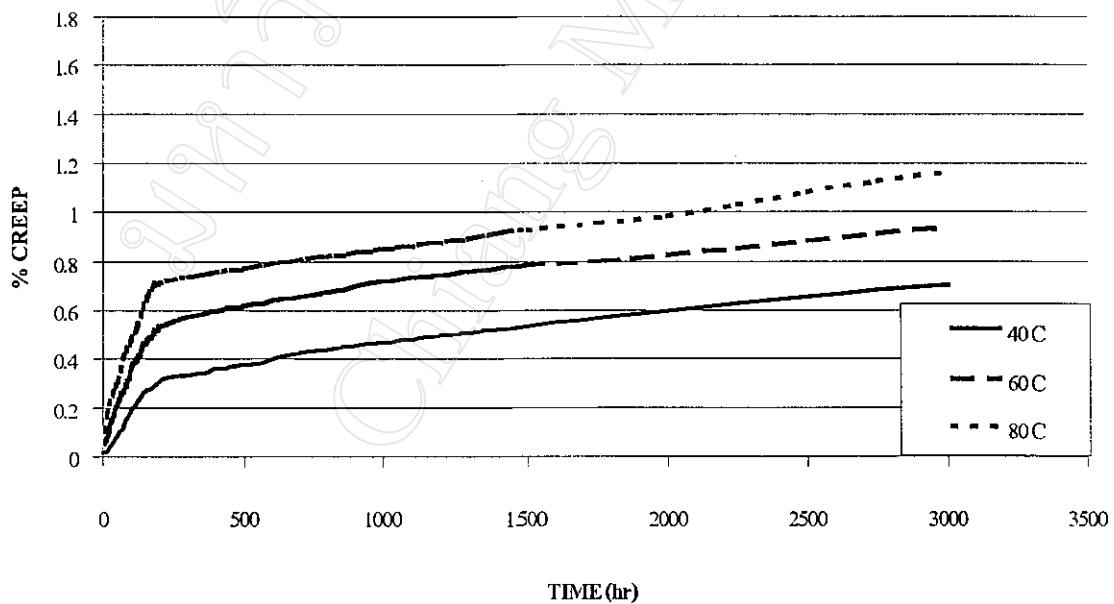
โดยผลการทดลองจะเป็นเช่นเดียวกันกับทั้งท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 และ R123 ที่ตามแนวความยาว และในด้านแนวรัศมี และทั้งค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ดังแสดงในรูป 4.1 ถึง 4.8 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เช่นนี้ก็เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทำงานให้สูงขึ้น จะเป็นการเพิ่มพลังงานให้สายโซ่โมเลกุลของท่อพลาสติกที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบให้มีการเคลื่อนตัวไปมากขึ้น นอกจากนั้นการทดลองนี้อุณหภูมิ และความดันของสารทำงานยังมีค่าแปรผันตามกันด้วย ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความดันจะสูงขึ้น ทำให้การคืบเกิดได้มาก (Herman., 1996) การคืบที่อุณหภูมิสูง และความดันสูงจึงมีมากกว่า ที่อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำ



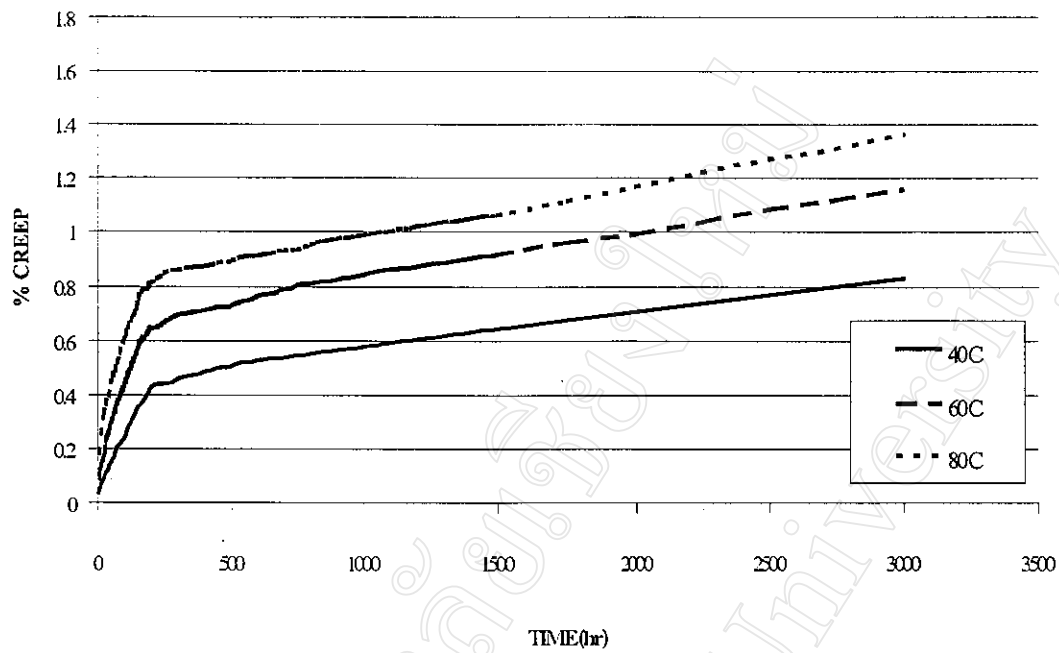
รูปที่ 4.1 การคืบของท่อทดสอบด้านความยาว ที่ใช้สารทำงาน R113 ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิต่างๆ



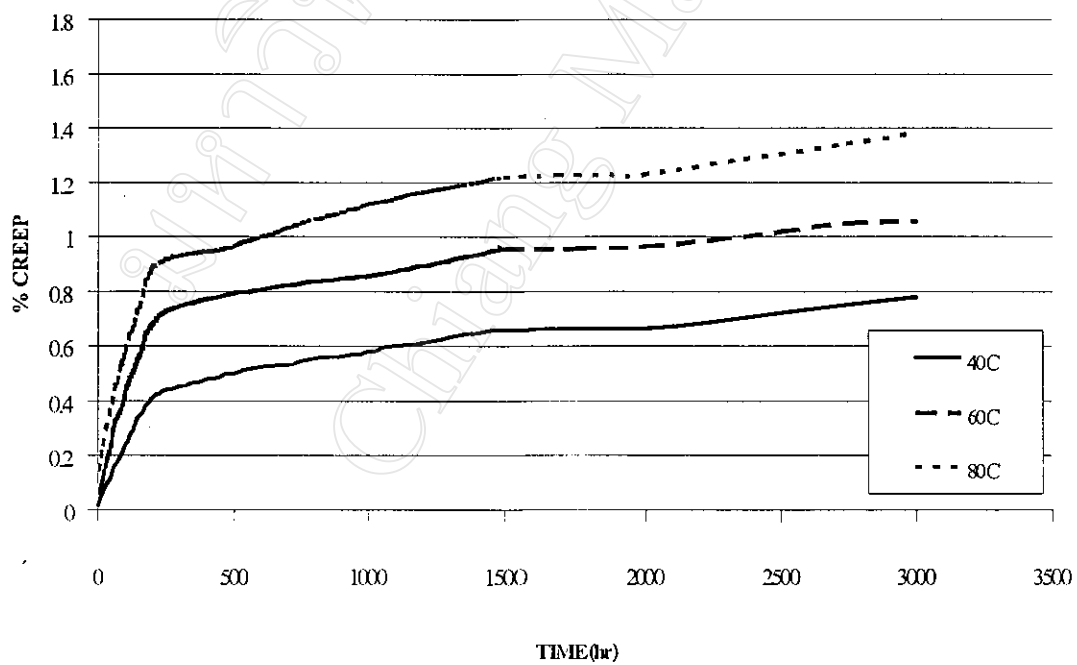
รูปที่ 4.2 การคืบของท่อทดสอบด้านความยาว ที่ใช้สารทำเย็น R113 ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



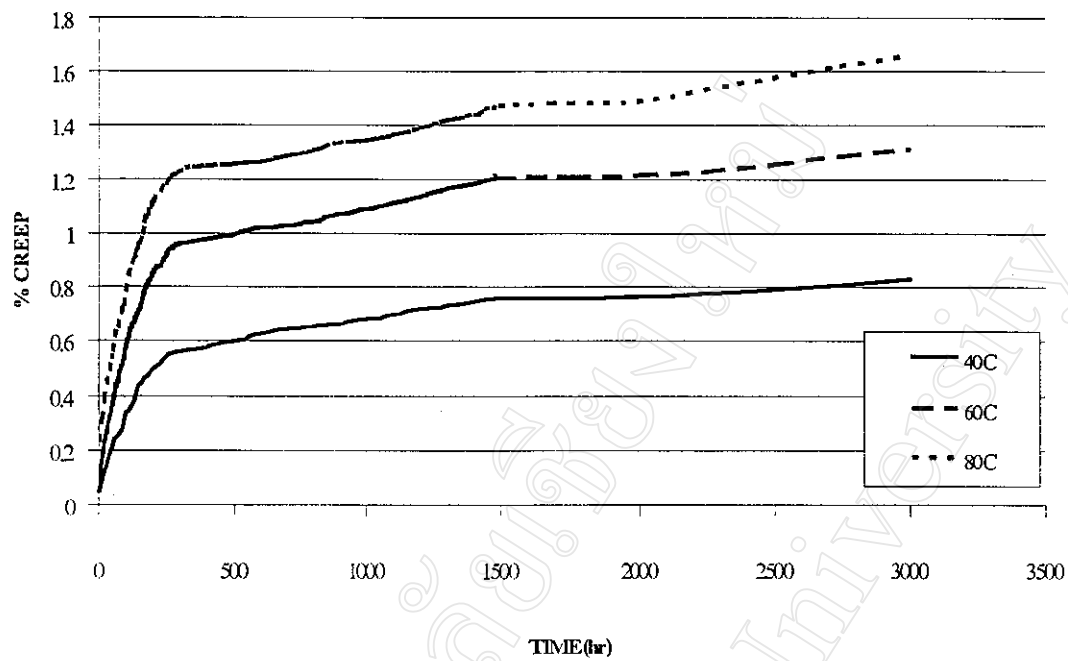
รูปที่ 4.3 การคืบของท่อทดสอบด้านความยาว ที่ใช้สารทำเย็น R123 ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิต่างๆ



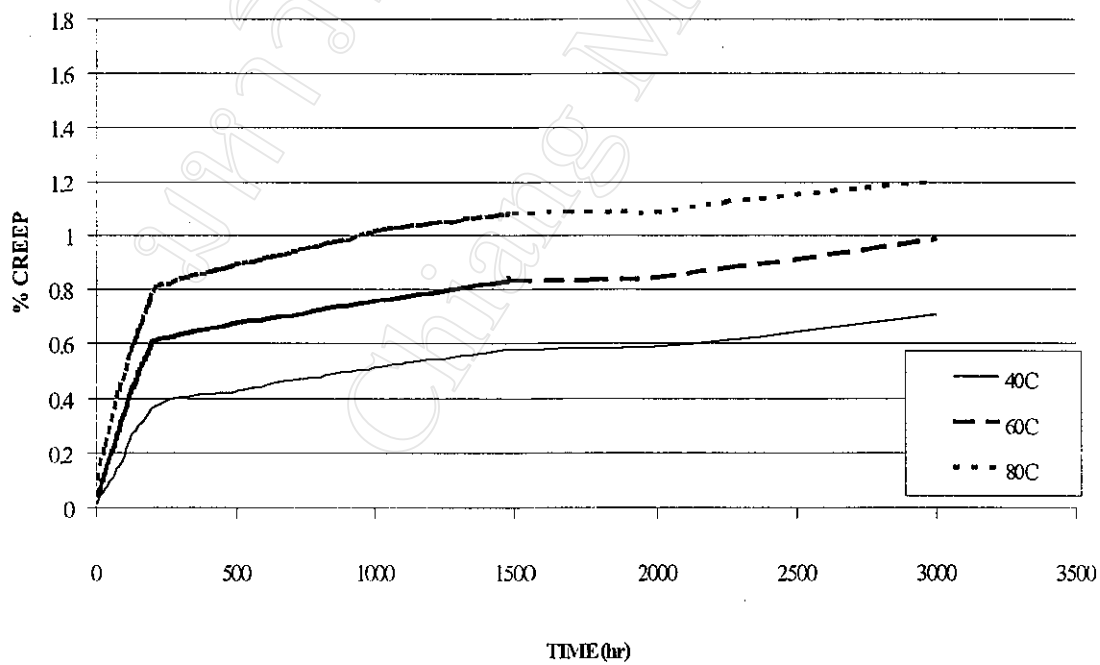
รูปที่ 4.4 การคืบของท่อทดสอบด้านความยาว ที่ใช้สารทำเย็น R123 ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



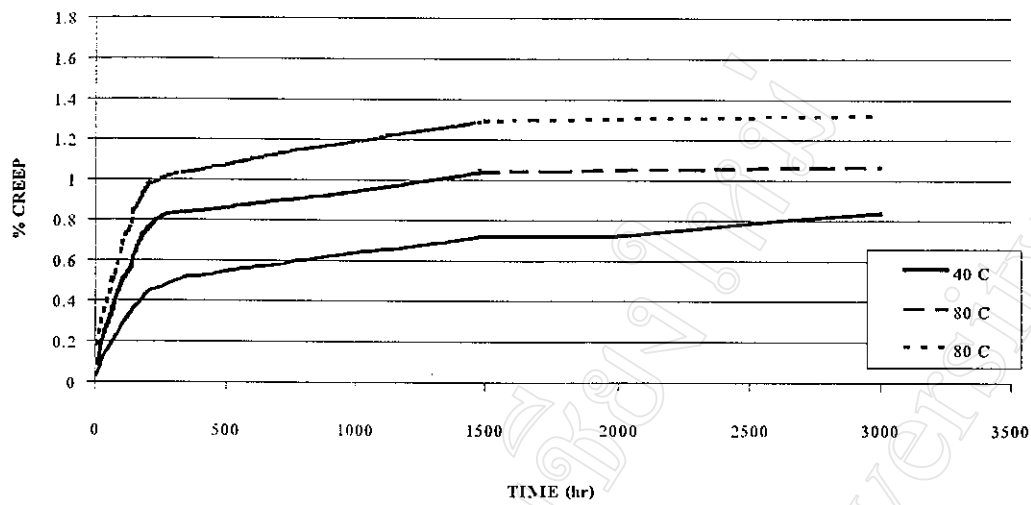
รูปที่ 4.5 การคืบของท่อทดสอบในแนวรัศมีที่ใช้สารทำเย็น R113 ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.6 การคืบของท่อทดสอบในแนวนอนที่ใช้น้ำมัน R113 ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.7 การคืบของท่อทดสอบในแนวนอนที่ใช้น้ำมัน R123 ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิต่างๆ

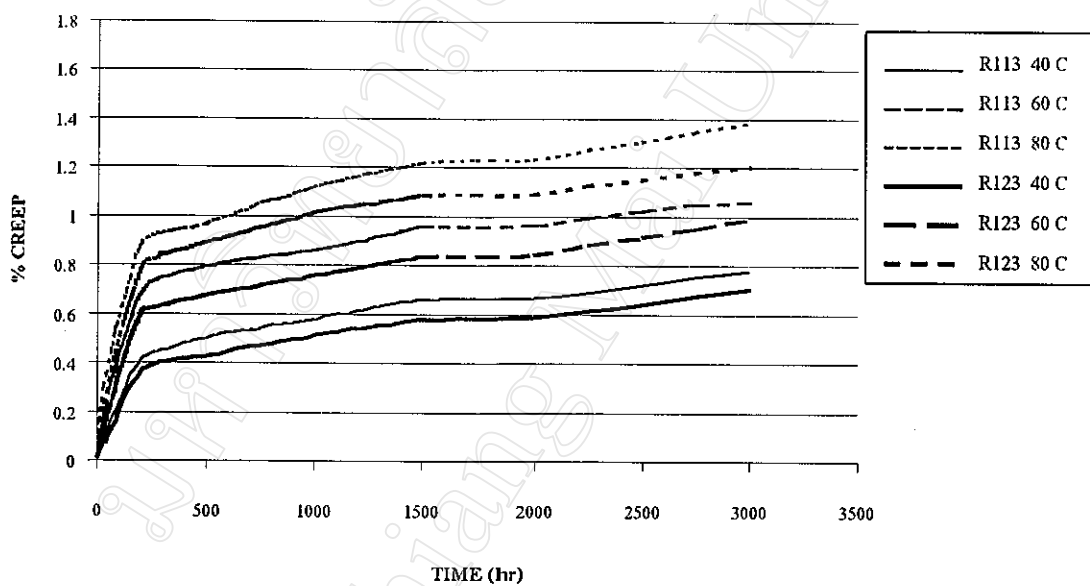


รูปที่ 4.8 การคืบของท่อทดสอบในแนวรัศมีที่ใช้สารทำงาน R123 ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ

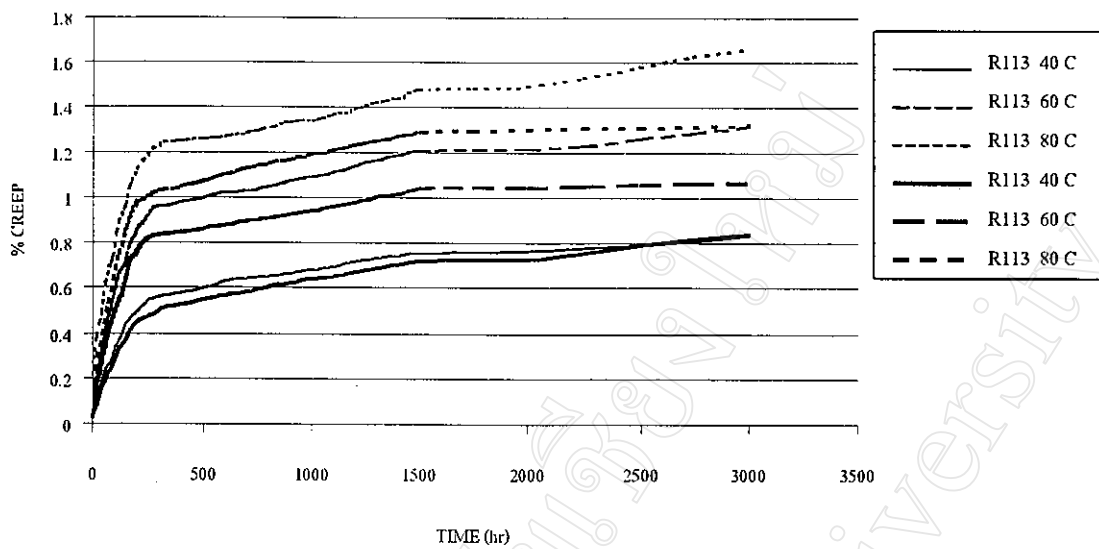
4.1.2 ผลของสารทำงาน

รูป 4.9 ถึง 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละของการคืบ กับ เวลา จากการทดลองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบระหว่างสารทำงาน 2 ชนิด คือ R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำงาน R113 จะเกิดการคืบมากกว่าท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำงาน R123 ที่ทุกๆ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 80°C จะมี ร้อยละของการเกิดการคืบมากที่สุด และจะลดลงที่ 60°C และ 40°C ตามลำดับ โดยแสดงค่าความแตกต่างของการคืบ ของสารทำงาน R113 และ R123 ดังตาราง ข-5 ถึง ข-6

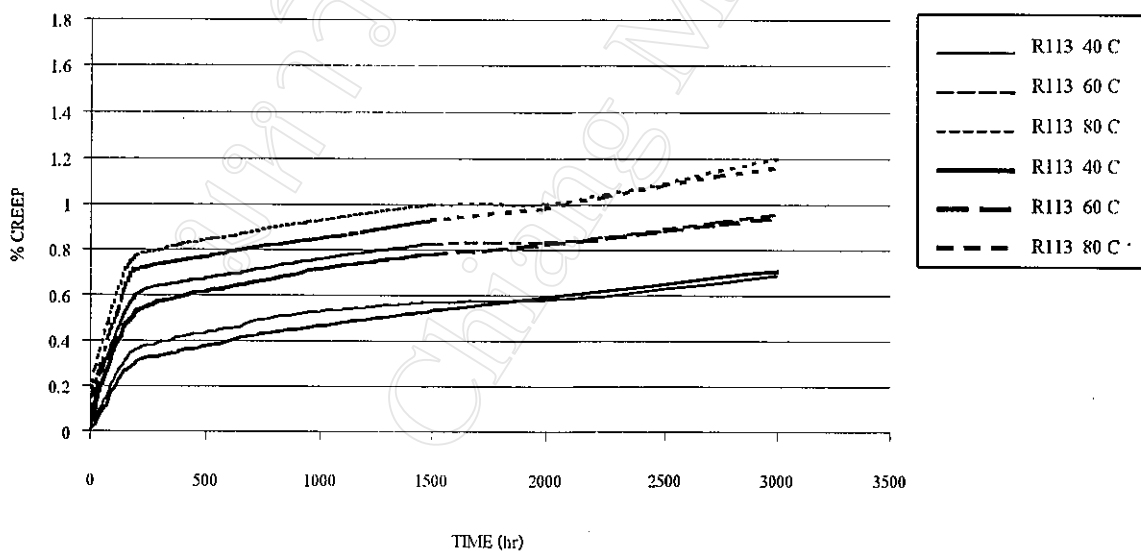
โดยผลการทดลองจะเป็นเช่นเดียวกันกับทั้งใน ด้านเนวรัสมิ และตามแนวความยาว และทั้งค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และ ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ซึ่งผลจากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยของ ศศิธร ประกายวิทย์ (2544) ซึ่งพบว่าชั้นทดสอบที่แช่ใน R113 จะมีค่าความแข็งแรงครากต่ำกว่าชั้นทดสอบที่แช่ใน R123 ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ คือ เนื่องจาก R113 แพร่ผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้มากกว่า R123 เมื่อสารทำงานแพร่ผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อท่อ เอชดีพีอี มากขึ้น โมเลกุลของสารทำเย็นก็จะไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลเอชดีพีอี ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเอชดีพีอีลดลงบางส่วน เกิดการ Plasticization ขึ้น จึงทำให้เกิดการคืบง่ายขึ้น



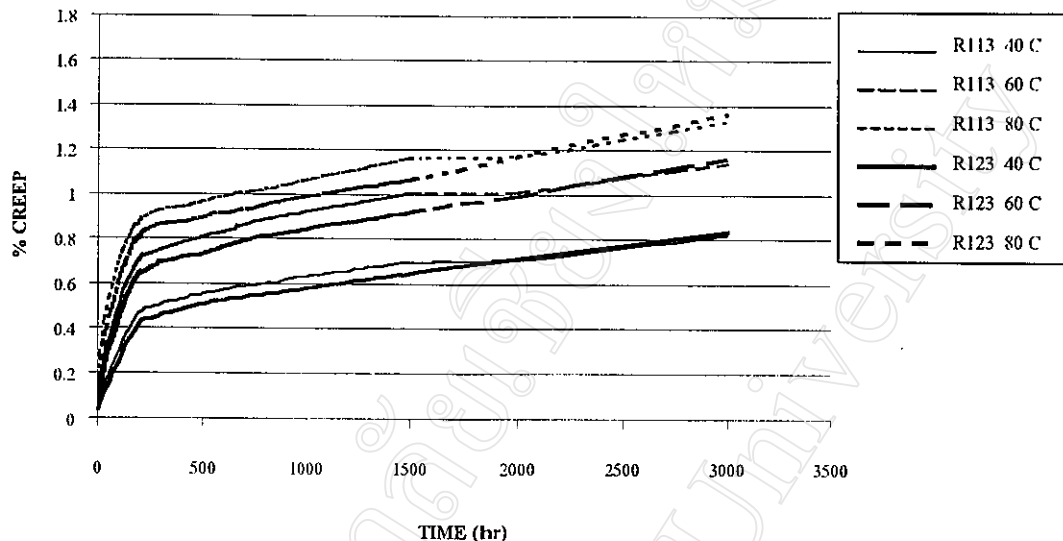
รูปที่ 4.9 การคืบของท่อทดสอบในเนวรัสมิที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง
เปรียบเทียบระหว่างสารทำเย็น R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.10 การคืบของท่อทดสอบในแนวรัศมีที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ
เปรียบเทียบระหว่างสารทำเย็น R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ

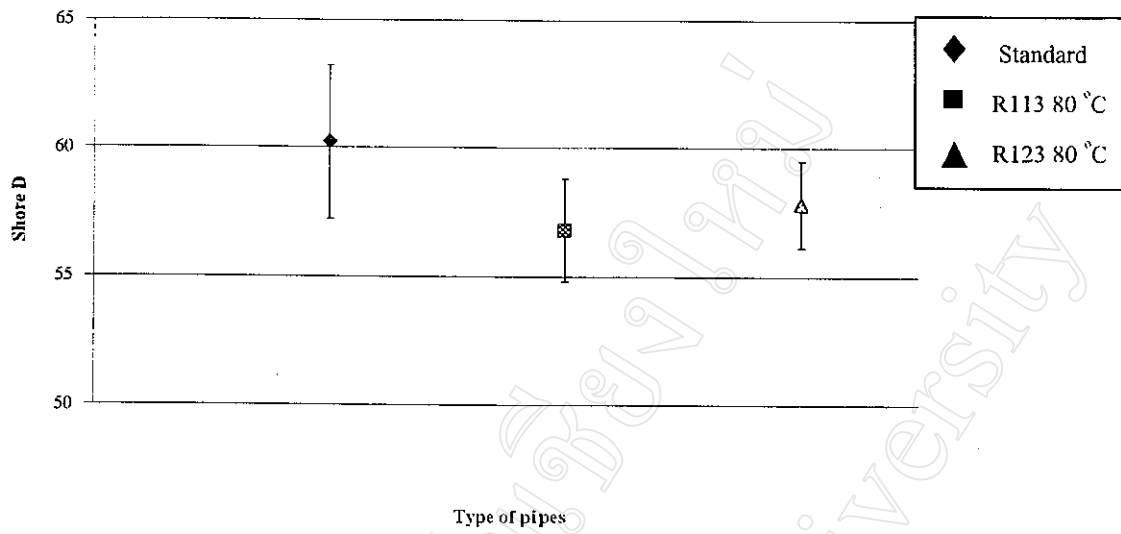


รูปที่ 4.11 การคืบของท่อทดสอบในแนวความยาวที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง
เปรียบเทียบระหว่างสารทำเย็น R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ

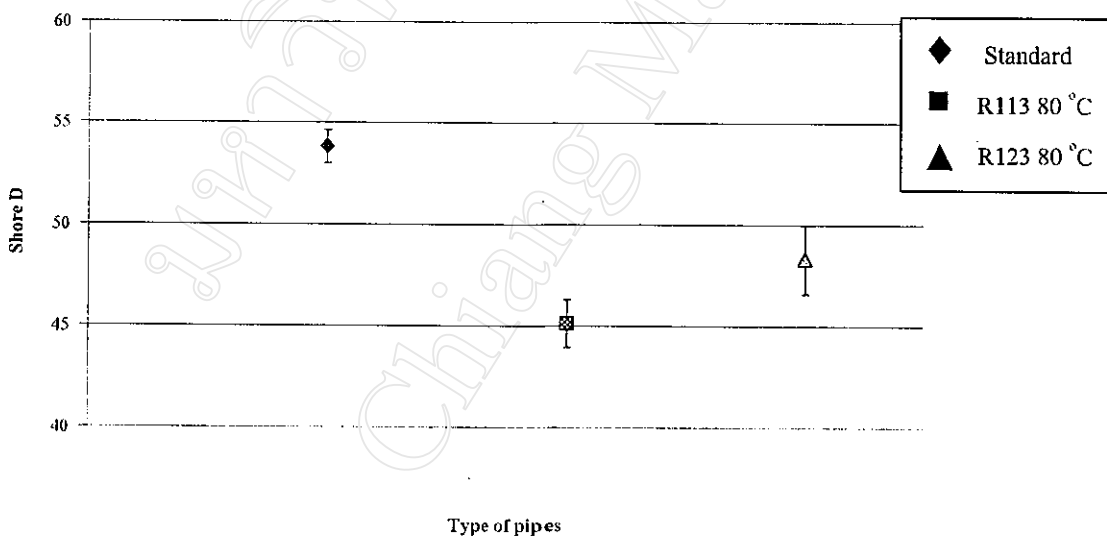


รูปที่ 4.12 การคืบของท่อทดสอบในแนวความยาวที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ
เปรียบเทียบระหว่างสารทำเย็น R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดสอบความแข็งที่ผิวของท่อตามมาตรฐาน ASTM D2240-91 เพื่อมาใช้ประกอบการอธิบายผลเนื่องจากการแพร่ของสารทำงานที่ไปทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลให้ลดลง โดยเปรียบเทียบระหว่างสารทำงาน R113 และ R123 จากการทดสอบสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นผลการทดสอบความแข็งของท่อภายนอก จะพบว่าความแข็งที่ผิวของท่อในทุกกรณีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบความแข็งของผิวท่อภายในจะพบว่าท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 มีค่าความแข็งที่ผิวดำกว่าท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตาราง ข-15 และ ข-16 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ศศิธร ประกายวิทย์ (2544) ที่ว่าชั้นทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 จะมีค่าความเค้นครากต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 เช่นกัน



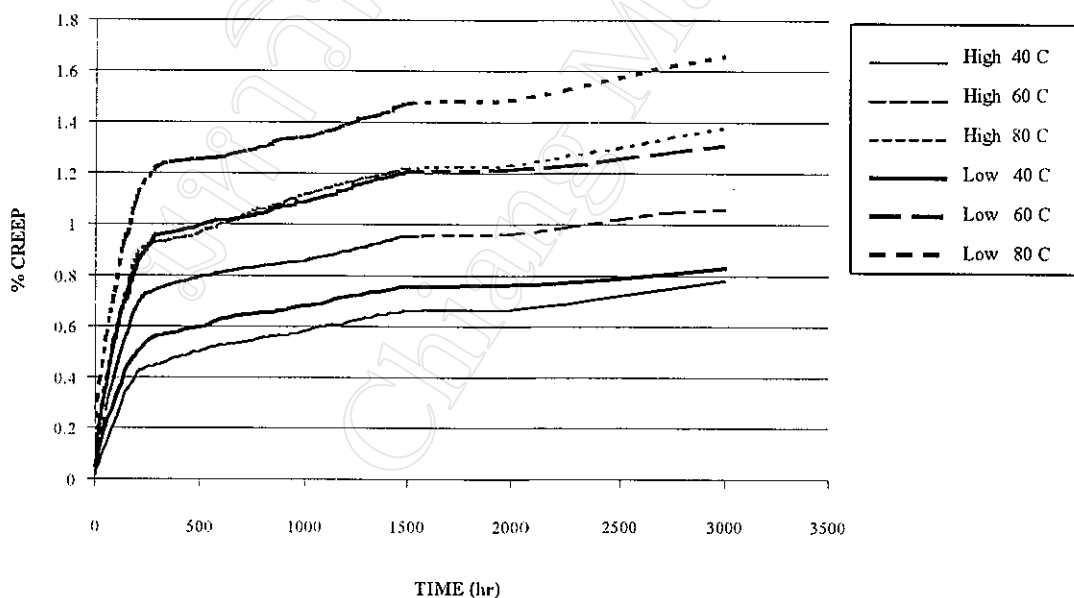
รูปที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งที่ผิวนอกของท่อทดสอบ



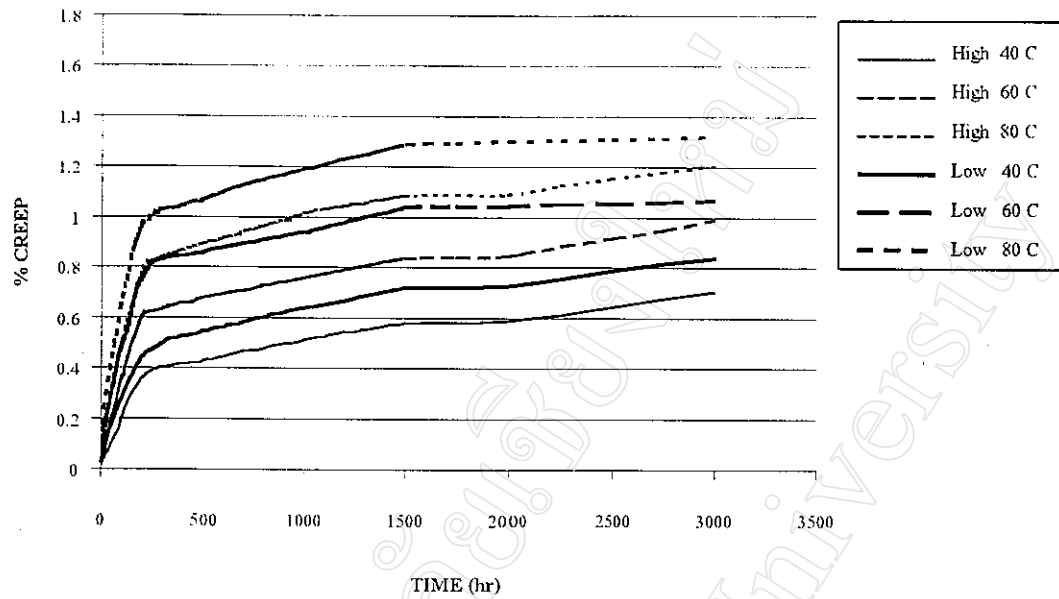
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งที่ผิวในของท่อทดสอบ

4.1.3 ผลของค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่น

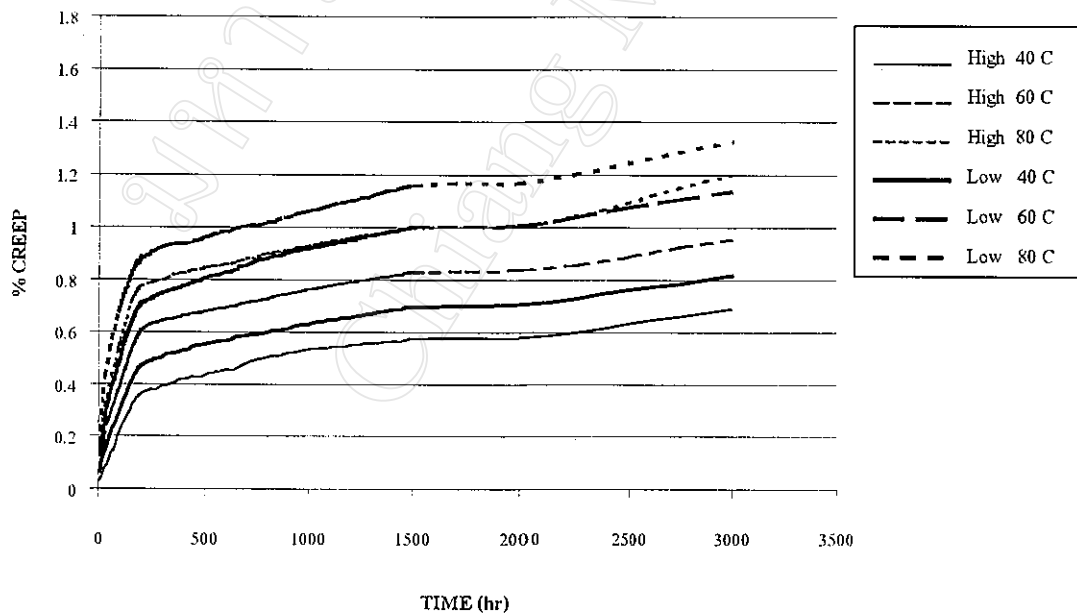
รูป 4.15 ถึง 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การคืบ กับ เวลาจากการทดลองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3000 ชั่วโมงโดยเปรียบเทียบระหว่าง ค่าฟลักซ์ความร้อน 2 ค่า คือ ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และ ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 และ R123 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยที่ค่าฟลักซ์ความร้อน คือค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของส่วนระบายความร้อน ถ้าค่าฟลักซ์ความร้อนสูงนั้นแสดงว่ามีค่าการส่งถ่ายความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้มากเมื่อเทียบกับค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ทำให้มีอุณหภูมิสะสมอยู่ที่ส่วนทำระเหยน้อย เมื่ออุณหภูมิสะสมที่ส่วนทำระเหยน้อยจะทำให้ความดันภายในท่อทดสอบลดลง ท่อทดสอบจึงรับความเค้นน้อยลงด้วย ส่งผลทำให้เกิดการคืบน้อยกว่าที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.1 จากผลการทดลองจะเห็นว่าท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานที่ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูงจะมีการเกิดการคืบน้อยกว่าท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานที่ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ โดยที่ผลจะเกิดขึ้นเดียวกันกับท่อใช้สารทำงาน R113 และ R123 และทุกๆอุณหภูมิ โดยความแตกต่างของการคืบที่เกิดขึ้นระหว่าง ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำที่มีมากกว่าค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ดังแสดงใน ตารางที่ ข-7 และ ข-8



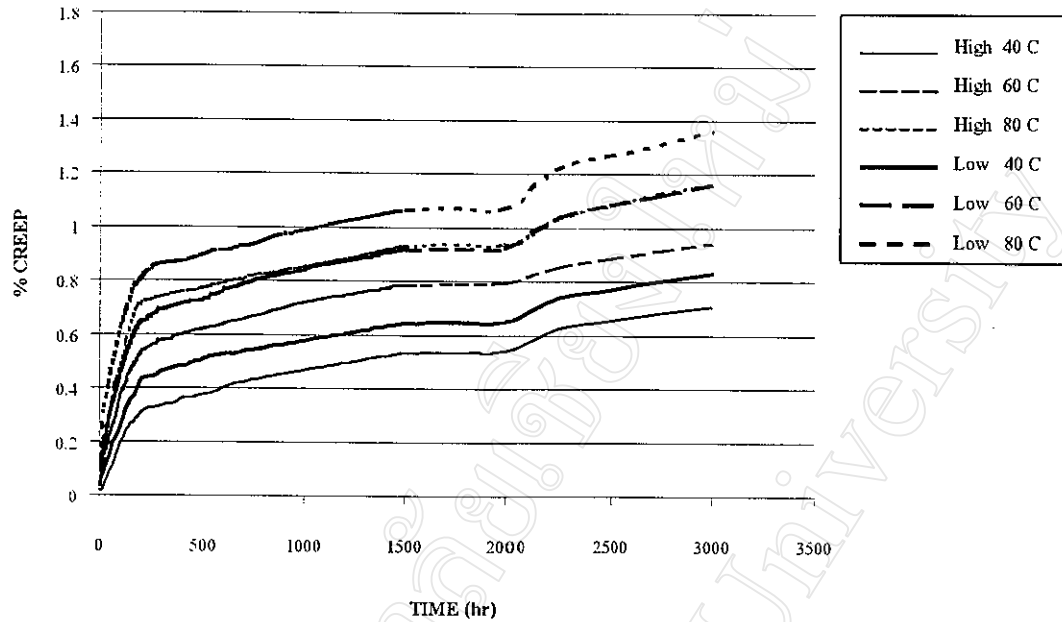
รูปที่ 4.15 การคืบของท่อทดสอบในแนวนอนของสารทำงาน R113
เปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.16 การคืบของท่อทดสอบในแนวรัศมี ของสารทำเย็น R123
เปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.17 การคืบของท่อทดสอบในแนวความยาว ของสารทำเย็น R113
เปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.18 การคืบของท่อทดสอบในแนวความยาว ของสารทำเย็น R123
เปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.4 ผลของการคืบที่มีต่อด้านแนวรัศมี และตามแนวความยาว

จากการทดลองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง รูป 4.19 ถึง 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการคืบ กับ เวลา โดยเปรียบเทียบระหว่าง ด้านแนวรัศมี และตามแนวความยาว ที่อุณหภูมิ ค่าฟลักซ์ความร้อน และเวลาต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ด้านแนวรัศมี จะมีการเกิดการคืบมากกว่าที่ด้านตามแนวยาว โดยที่ผลจะเกิดเช่นเดียวกันกับท่อใช้สารทำงาน R113 และ R123 และ ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง และ ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ และทุกๆอุณหภูมิ โดยแสดงความแตกต่างของการคืบระหว่างด้านแนวรัศมีที่มีมากกว่าที่ด้านตามแนวความยาว ดังแสดงในตารางที่ ข.9 ถึง ข.10

ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับท่อที่มีความดันภายใน สามารถแสดงได้ดังสมการ (4.1) ถึง (4.5) และการขยายตัวในแนวรัศมี และในแนวความยาวสามารถแสดงได้ดังสมการ (4.6) ถึง (4.7) ตามลำดับ จะเห็นว่าความเค้นที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวรัศมี จะมีค่ามากกว่าความเค้นที่ทำให้เกิดการขยายตัวตามแนวความยาว ด้วยเหตุนี้การคืบในแนวรัศมีจึงเกิดมากกว่าในแนวความยาว

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t} \quad (4.1)$$

$$\sigma_z = \frac{PD}{4t} \quad (4.2)$$

$$\sigma_r = -P \quad (4.3)$$

$$\epsilon_h = \frac{1}{E} \left[\frac{PD}{2t} - \nu \left(\frac{PD}{4t} - P \right) \right] \quad (4.4)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \left[\frac{PD}{4t} - \nu \left(\frac{PD}{2t} - P \right) \right] \quad (4.5)$$

$$R = \epsilon_h \left(\frac{D}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$L = \epsilon_z (L) \quad (4.7)$$

เมื่อ σ_h , σ_z และ σ_r คือ ความเค้นในแนวเส้นรอบวง แนวความยาว และแนวรัศมีตามลำดับ

ϵ_h และ ϵ_z คือ ความเครียดในแนวเส้นรอบวง และแนวความยาวตามลำดับ

P คือ ความดันที่อุณหภูมิทดสอบ

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

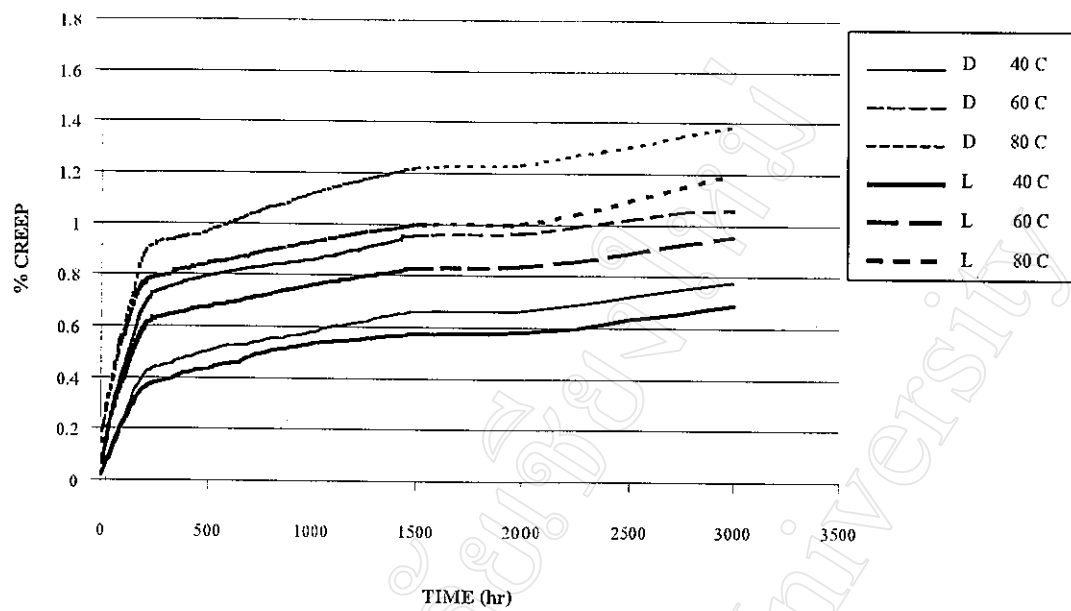
t คือ ความหนาของท่อ

E คือ ค่าโมดูลัสของพลาสติก

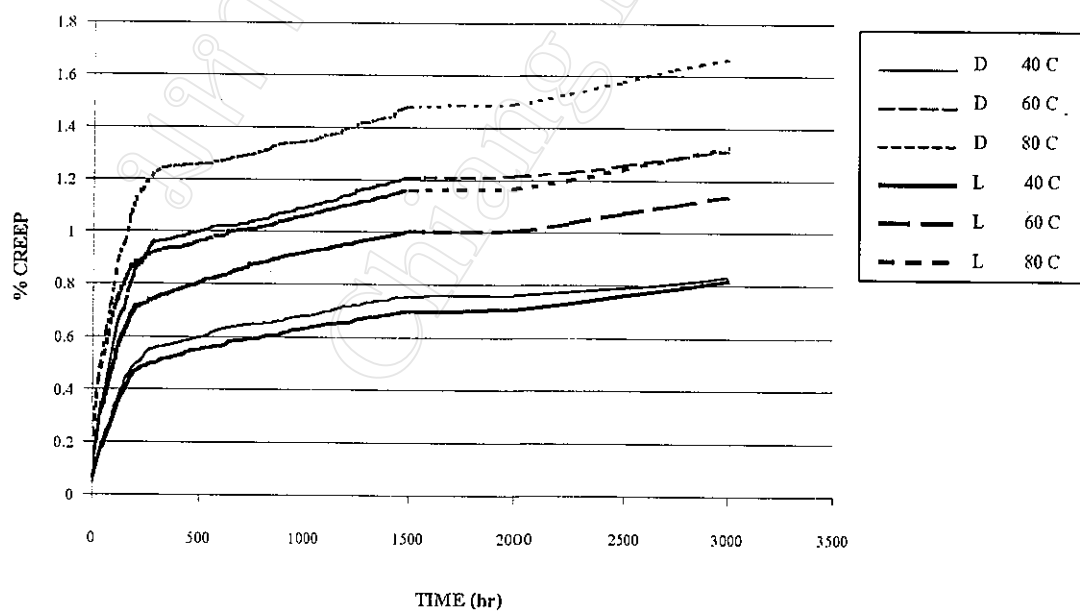
ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

R คือ การขยายตัวในแนวรัศมี

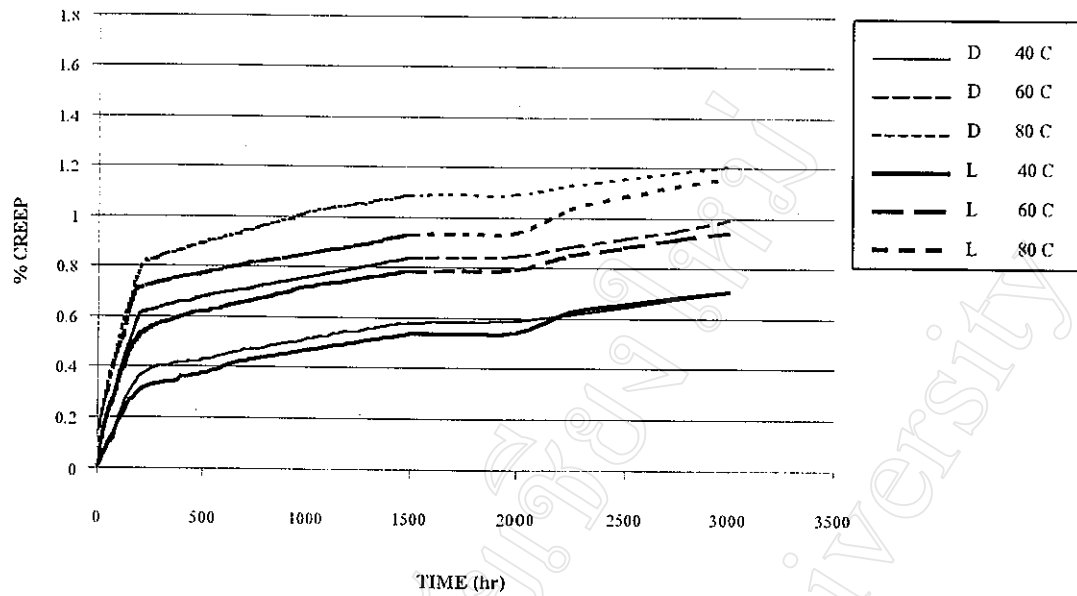
L คือ การขยายตัวตามแนวความยาว



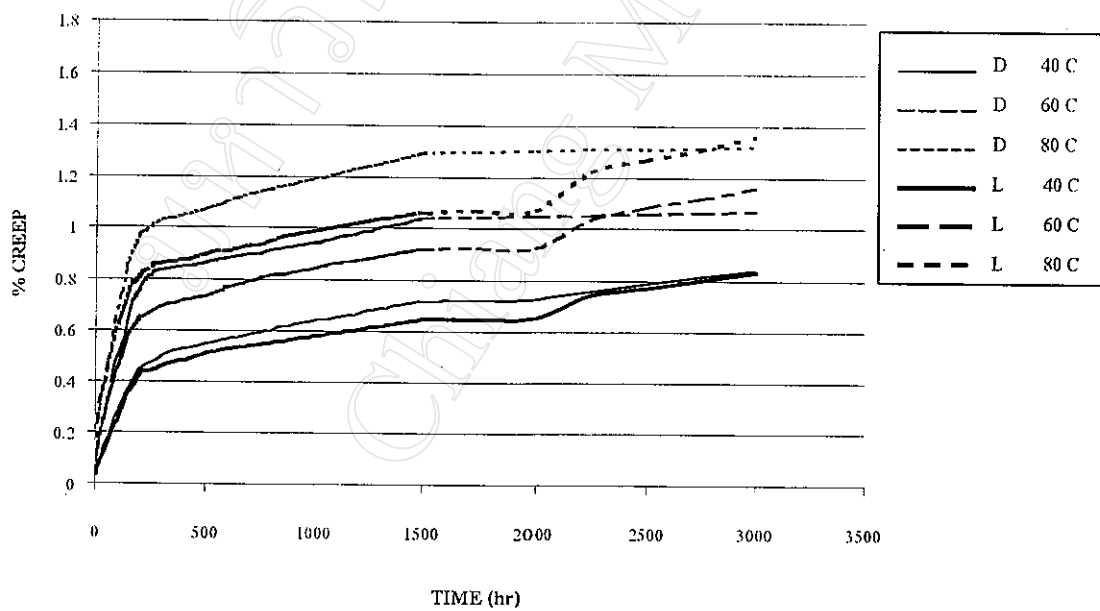
รูปที่ 4.19 การคืบของท่อทดสอบที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ของสารทำเย็น R113
เปรียบเทียบระหว่าง ในแนวรัศมีและแนวความยาว ของท่อ ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.20 การคืบของท่อทดสอบที่ค่า ฟลักซ์ความร้อนต่ำ ของสารทำเย็น R113
เปรียบเทียบระหว่างในแนวรัศมีและแนวความยาว ของท่อ ที่อุณหภูมิต่างๆ



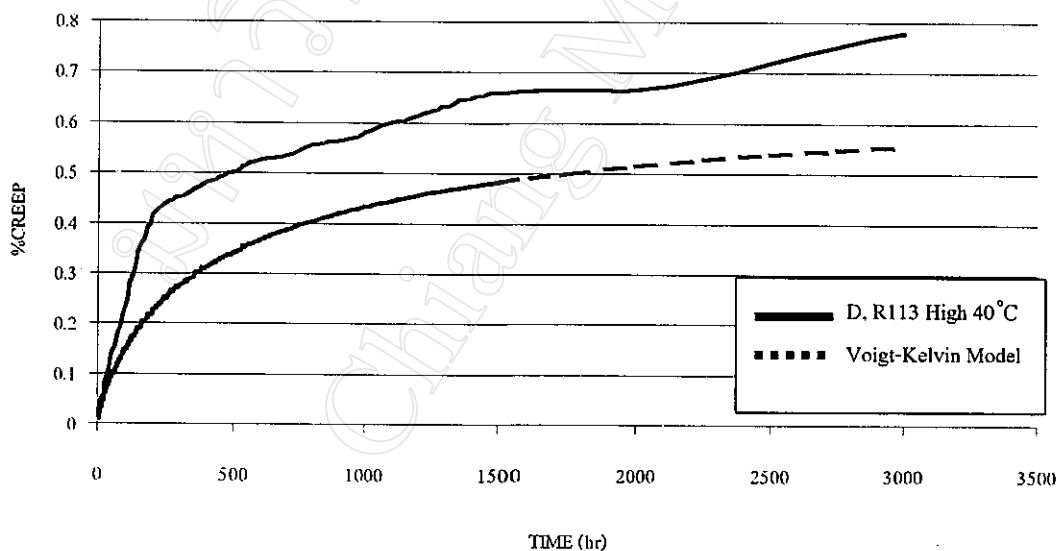
รูปที่ 4.21 การคืบของท่อทดสอบที่ค่า ค่าฟลักซ์ความร้อนสูง ของสารทำเย็น R123
เปรียบเทียบระหว่างในแนวรัศมีและแนวความยาว ของท่อ ที่อุณหภูมิต่างๆ



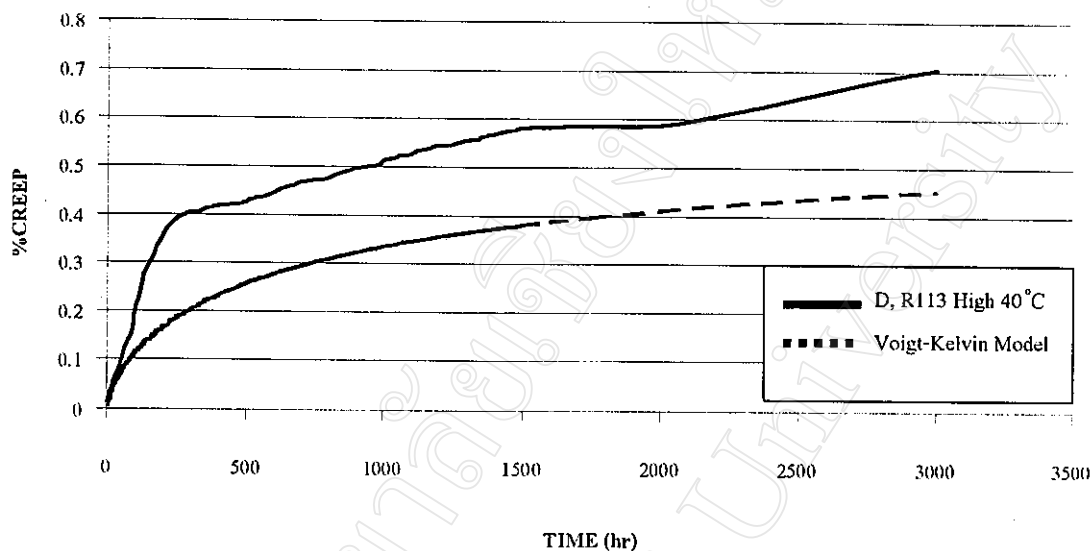
รูปที่ 4.22 การคืบของท่อทดสอบที่ค่า ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ของสารทำเย็น R123
เปรียบเทียบระหว่างในแนวรัศมีและแนวความยาว ของท่อ ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.5 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาการอัตราเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอน

หลังจากได้ข้อมูลการคืบจากการทดสอบแล้วได้ทำการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายการคืบ โดยใช้แบบจำลองของ วัค-เคลวิน แต่ปรากฏว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลการคืบที่ได้จากการทดสอบได้ ดังแสดงในรูป 4.23 และ 4.24 สำหรับท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานที่อุณหภูมิ 40°C ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่ด้านรัศมี ของสารทำงาน R113 และ R123 ตามลำดับ จะเห็นว่าการใช้แบบจำลองของ วัค-เคลวิน จะได้แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การคืบที่ไปทางเดียวกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แต่ค่าที่ได้จะน้อยกว่าข้อมูลการทดลอง เนื่องจากแบบจำลองของ วัค-เคลวิน จะใช้ทำนายพฤติกรรมของการเกิดการคืบ โดยอาศัยพื้นฐานของสปริง และตัวหน่วง ตามอุดมคติ อย่างละ 1 ตัวจึงไม่ได้รวมค่าของการเพิ่มขึ้นแบบอิลาสติก (σ/ϵ) ในช่วงแรกของการเกิดการคืบไว้ด้วยดังนั้นค่าที่ได้จากสมการจึงน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง และเนื่องจากผลการทดลองไม่ได้มีเฉพาะผลของการคืบเพียงอย่างเดียวแต่ได้รวมเอาผลของการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิเข้าไปด้วยเพราะในการวัดการคืบนั้นทำการวัดขณะที่ท่อยังร้อนอยู่เป็นต้น

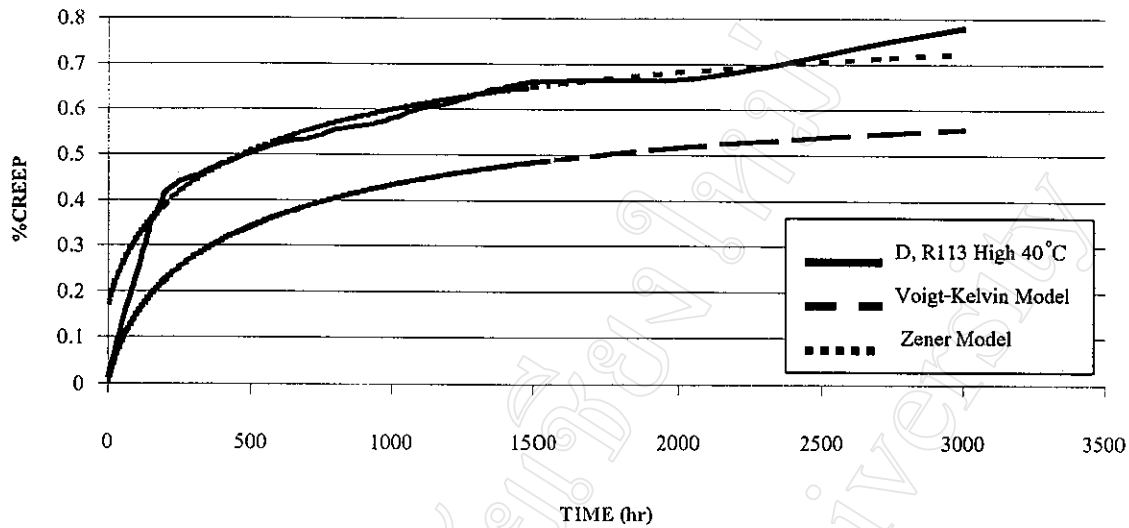


รูปที่ 4.23 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ วัค-เคลวิน ทำนายการคืบของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ด้านรัศมี อุณหภูมิ 40°C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง

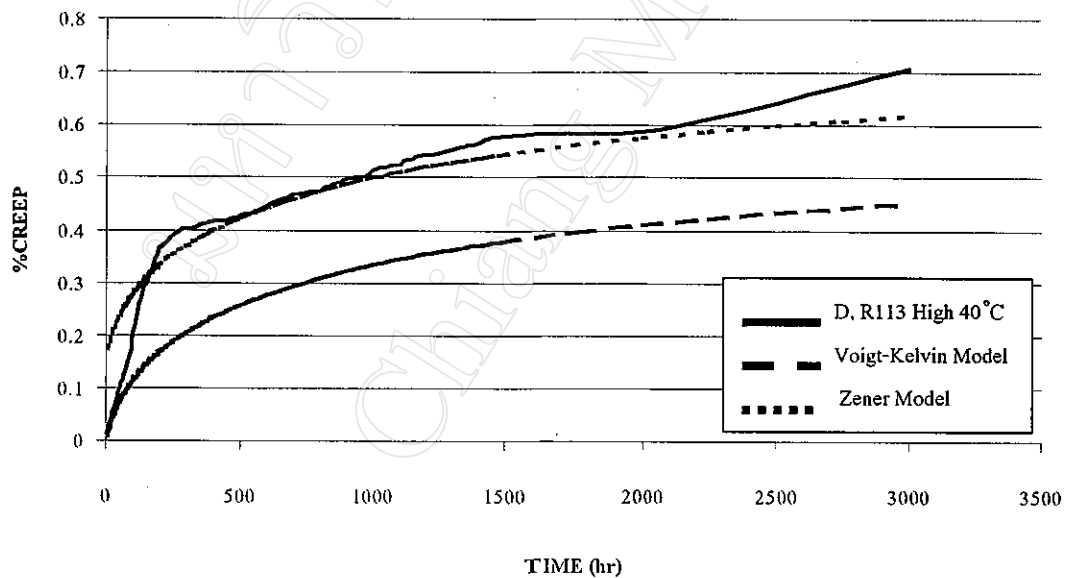


รูปที่ 4.24 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ โวค-เคลวิน ทำนายการคืบของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R123 ด้านรัศมี อุณหภูมิ 40 °C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง

ดังนั้นจึงต้องใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนขึ้นโดยความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองของซินาร์ ซึ่งสามารถจำลองความเครียดในฟังก์ชันของเวลา $\epsilon(t)$ ได้โดยแสดงในรูปของความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ที่ระยะเวลาการให้ภาระใดๆ โดยที่จำนวนของ อิทธิเมนต์ที่ต่อเพิ่มนี้จะทำให้สมการมีจำนวนเทอมของตัวแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งรวมพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบ อิลาสติก ในช่วงแรกเข้าไปด้วย ทำให้ความถูกต้องในการอธิบายพฤติกรรมการคืบมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลการคืบที่ได้จากการทดสอบแล้ว จะเห็นว่าข้อมูลจากแบบจำลองสามารถสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลการคืบที่ได้จากการทดสอบได้เป็นอย่างดี ในช่วงเวลาประมาณ 200 ชั่วโมงไปจนถึงประมาณ 2500 ชั่วโมงสำหรับ R113 และที่เวลาประมาณ 500 – 2000 ชั่วโมงสำหรับ R123 จากรูป 4.25 และ 4.26 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ตามเวลาของเปอร์เซ็นต์การคืบของเทอร์โมโซฟอนที่ได้จากการใช้แบบจำลองของซินาร์ ที่อุณหภูมิ 40°C ค่า ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ด้านรัศมี ซึ่งใช้สารทำงาน R113 และ R123 ตามลำดับ

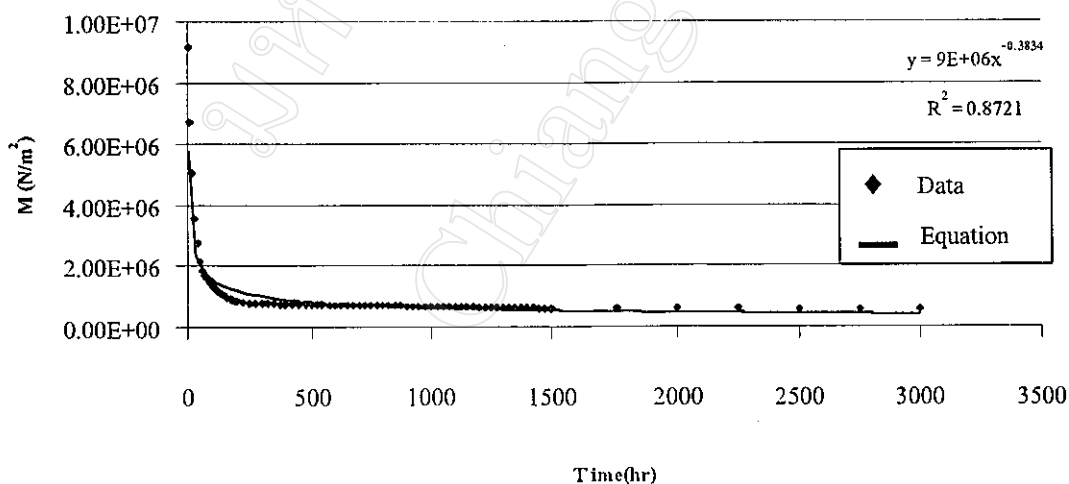


รูปที่ 4.25 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซีนาร์ และ โวค-เคลวิน ทำนายการคืบด้านรัศมีของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 อุณหภูมิ 40 °C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง

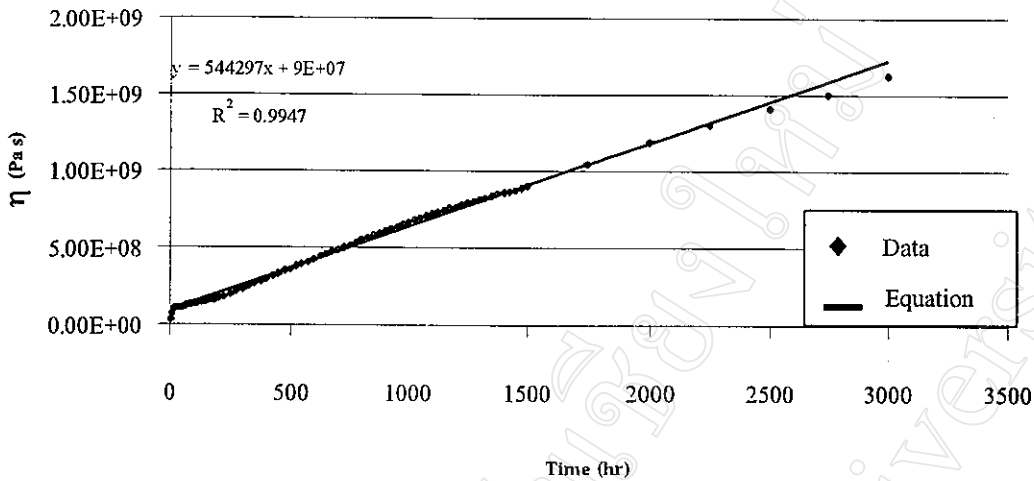


รูปที่ 4.26 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซีนาร์ และ โวค-เคลวิน ทำนายการคืบด้านรัศมีของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 อุณหภูมิ 40 °C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง

ซึ่งสิ่งที่ทำให้ข้อมูลจากแบบจำลอง ซินาร์ สามารถสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลการคืบที่ได้จากการทดสอบได้เป็นอย่างดี ในช่วงเวลาประมาณ 200 ชั่วโมงไปจนถึงประมาณ 2500 ชั่วโมงสำหรับ R113 และที่เวลาประมาณ 500 – 2000 ชั่วโมงสำหรับ R123 ก็เนื่องจากในแบบจำลองของ ซินาร์ เองนั้นจะสมมติว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้นพลาสติกได้มีความเครียดเริ่มต้นไว้แล้ว จึงทำให้ข้อมูลที่ได้ในช่วงแรกนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างมากต่างจากข้อมูลการทดสอบที่ค่าการคืบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่เวลาก่อนการทดสอบ และจากการแทนค่าเพื่อหาสมการของการคืบที่สภาวะใดๆ โดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสกับเวลา และค่าความหนืดกับเวลา เพื่อหาสมการที่ขึ้นกับเวลาของตัวแปรทั้ง 2 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.27 และ 4.28 เพื่อจะนำค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์นี้ไปจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการแบบจำลองของ ซินาร์ ซึ่งเมื่อทำการพล็อตความสัมพันธ์ ระหว่างค่าโมดูลัสกับเวลา แล้วจะเห็นว่าค่าโมดูลัสจะมีค่ามากที่ช่วงเวลาเริ่มต้น และจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นเมื่อแทนค่าหาการคืบแล้วจะเห็นว่าอัตราการคืบในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มอย่างมาก และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแต่อัตราที่น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อ พล็อตค่าความหนืดกับเวลา แล้วจะเห็นว่าความหนืดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถพล็อตเป็นสมการเส้นตรงได้ แต่ที่เวลาประมาณ 2500 ชั่วโมงนั้นข้อมูลการทดลองจะต่ำกว่าสมการเส้นตรงที่ได้จากการพล็อตสมการเส้นตรง ดังนั้นเมื่อแทนค่าหาการคืบแล้วจะเห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองนั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองด้วย



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์กับเวลาของค่า โมดูลัส ด้านรัศมี
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 อุณหภูมิ 60 °C พลั๊กซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์กับเวลาของค่า ความหนืด ด้านรัศมี
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 อุณหภูมิ 60 °C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง

ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองของ ชินาร์ มาสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลการคืบที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆแล้ว สามารถสร้างสมการของเส้นกราฟการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 จากข้อมูลการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิ (T) และเวลาทดสอบ (t) โดยเลือกขอบเขตของช่วงที่จะนำมาสร้างสมการ คือ เวลาทำงานในช่วง 0-3000 ชั่วโมง และอุณหภูมิทำงาน 40 60 และ 80 °C ของค่า ฟลักซ์ความร้อนสูง ด้านรัศมี และนำสมการทั้ง 3 มาหาความสัมพันธ์ เพื่อสร้างสมการทั่วไปของการเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\% \text{Creep}_{D,R113\text{High}} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(9 \times 10^6)t^{0.6166}}{5.44 \times 10^4 t + (9 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{5.72 \times 10^5}{(9 \times 10^6)t^{-0.3834}} \right) \right] + 0.317 \quad (4.8)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนต่ำ ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{D,R113Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(5 \times 10^6)t^{0.661}}{4.38 \times 10^5 t + (1 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{5.72 \times 10^5}{(5 \times 10^6)t^{-0.339}} \right) \right] + 0.3813 \quad (4.9)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนสูง ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R113High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(9 \times 10^6)t^{0.6166}}{5.44 \times 10^5 t + (9 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{2.86 \times 10^5}{(9 \times 10^6)t^{-0.3834}} \right) \right] + 0.317 \quad (4.10)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนต่ำ ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R113Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(5 \times 10^6)t^{0.661}}{4.38 \times 10^5 t + (1 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{2.86 \times 10^5}{(5 \times 10^6)t^{-0.339}} \right) \right] + 0.30 \quad (4.11)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนสูง ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{D,R123High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(9 \times 10^6)t^{0.6166}}{5.44 \times 10^5 t + (9 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{1.09 \times 10^6}{(9 \times 10^6)t^{-0.3834}} \right) \right] + 0.181 \quad (4.12)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพังก์ซ์ความร้อนต่ำ ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\%Creep_{D,R123Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(5 \times 10^6)t^{0.661}}{4.38 \times 10^5 t + (1 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{1.09 \times 10^6}{(5 \times 10^6)t^{-0.339}} \right) \right] + 0.286 \quad (4.13)$$

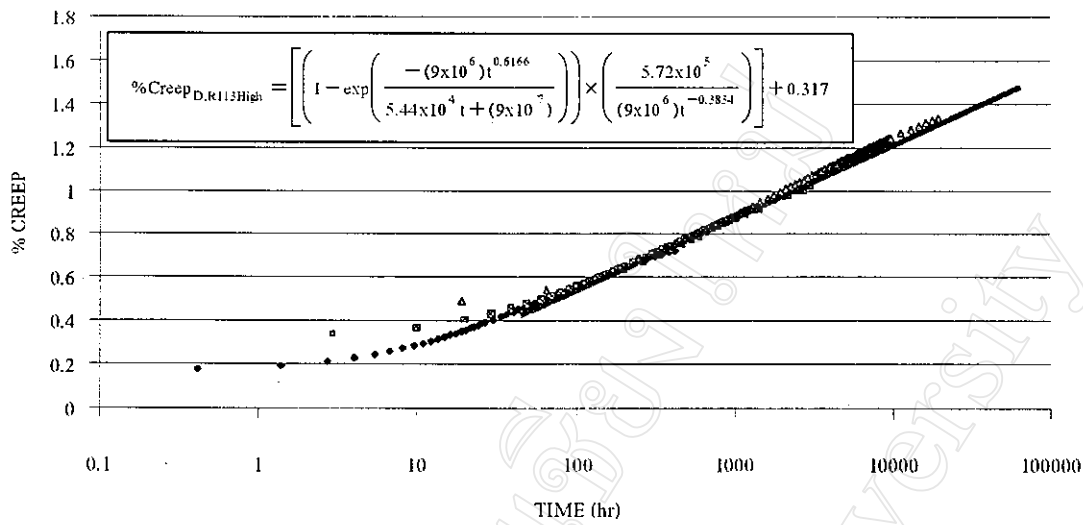
ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพังก์ซ์ความร้อนสูง ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R123High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(9 \times 10^6)t^{0.6166}}{5.44 \times 10^5 t + (9 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{5.44 \times 10^5}{(9 \times 10^6)t^{-0.3834}} \right) \right] + 0.201 \quad (4.14)$$

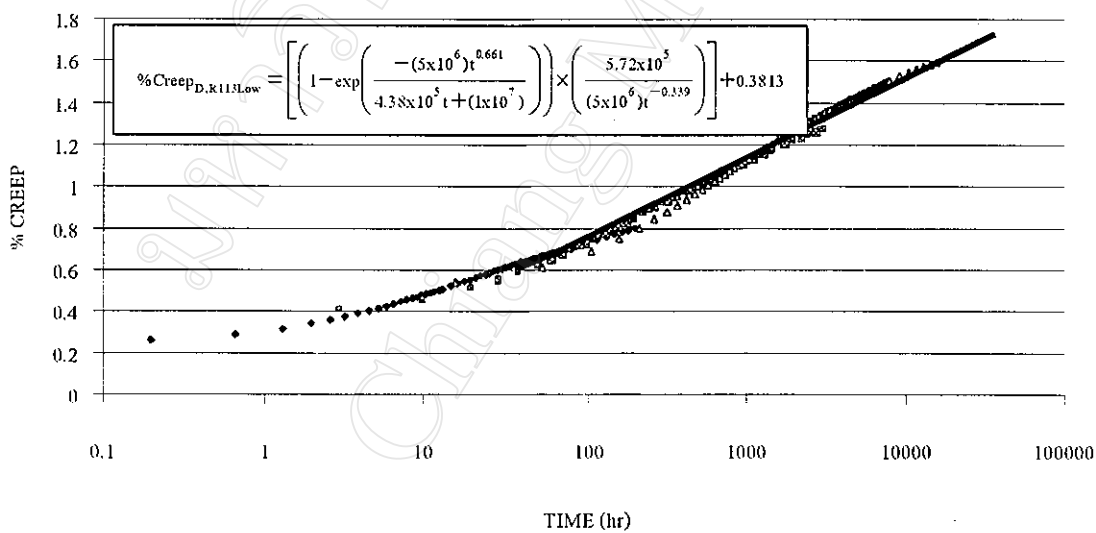
ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพังก์ซ์ความร้อนต่ำ ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 60 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R123Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(5 \times 10^6)t^{0.661}}{4.38 \times 10^5 t + (1 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{5.44 \times 10^5}{(5 \times 10^6)t^{-0.339}} \right) \right] + 0.286 \quad (4.15)$$

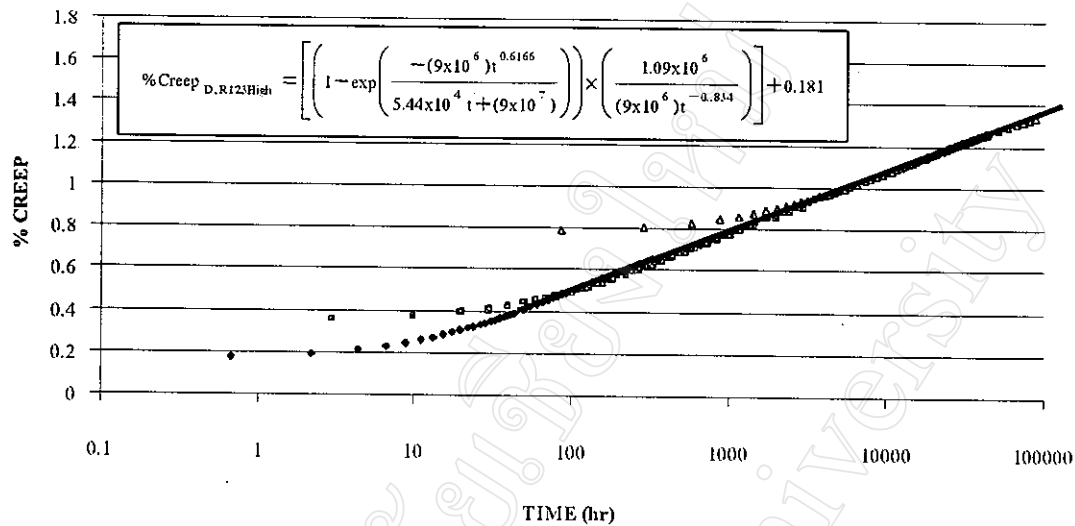
สมการทั่วไปทั้ง 8 สมการดังกล่าว จะแสดงดังรูปที่ 4.29 ถึง 4.36 สามารถใช้หาข้อมูลร้อยละของการเกิดการคืบได้จนถึงเวลาประมาณ 10000 ชั่วโมงโดยทั่วไปกราฟนี้สามารถทำการ extrapolate ไปอีกหนึ่งช่วงของเวลาใน log scale แต่ในกรณีนี้ไม่แนะนำให้ใช้เพราะข้อมูลที่ได้อาจแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูป 4.25 ถึง 4.26 ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้นจากการหาสมการความสัมพันธ์กับเวลา ของค่าโมดูลัส และค่าความหนืด ดังแสดงในรูป ก-1 ถึง ก-8 ตามลำดับ



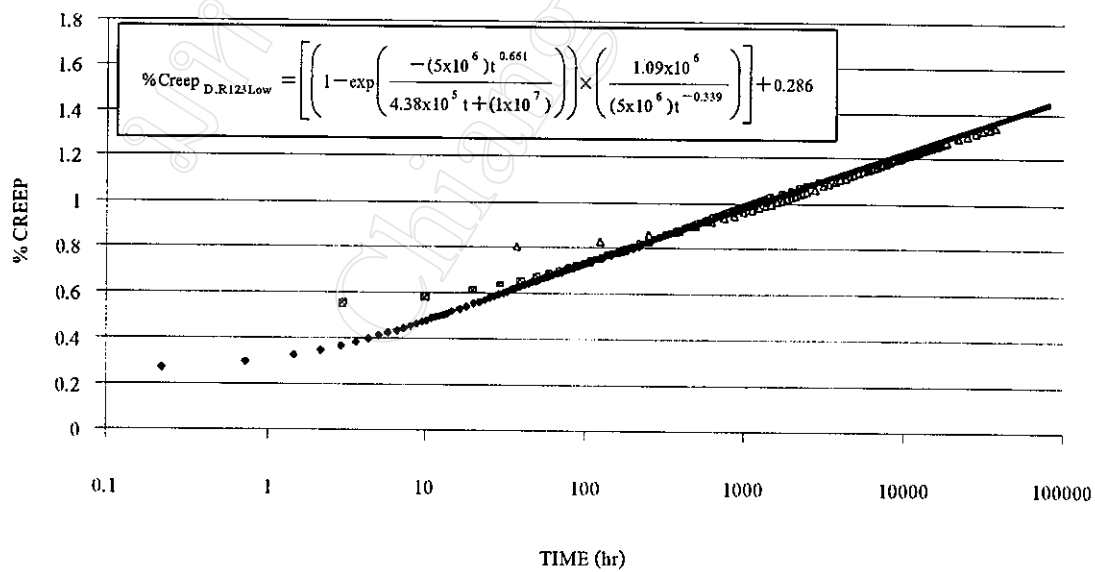
รูปที่ 4.29 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R113 ด้านรัศมี อุณหภูมิ 60 °C ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง



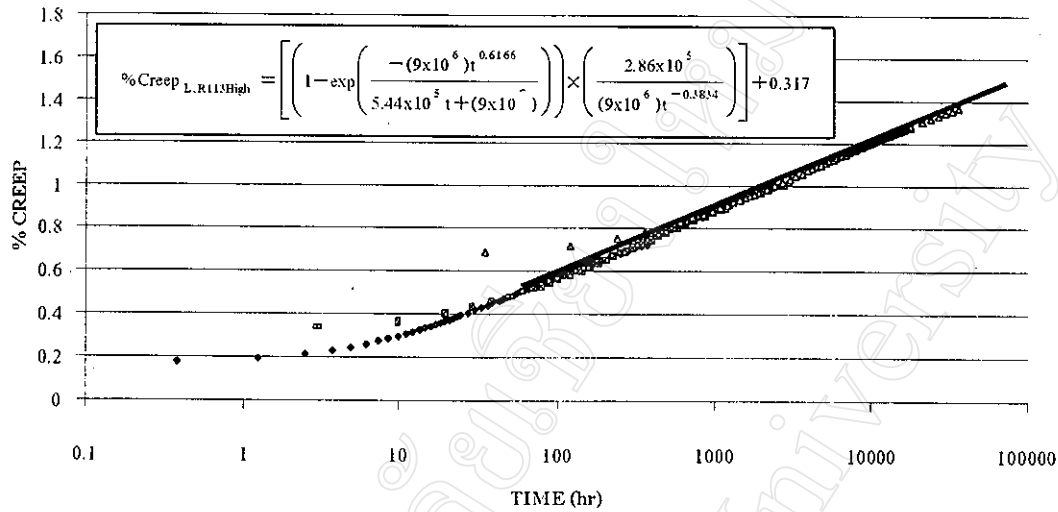
รูปที่ 4.30 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 60 °C



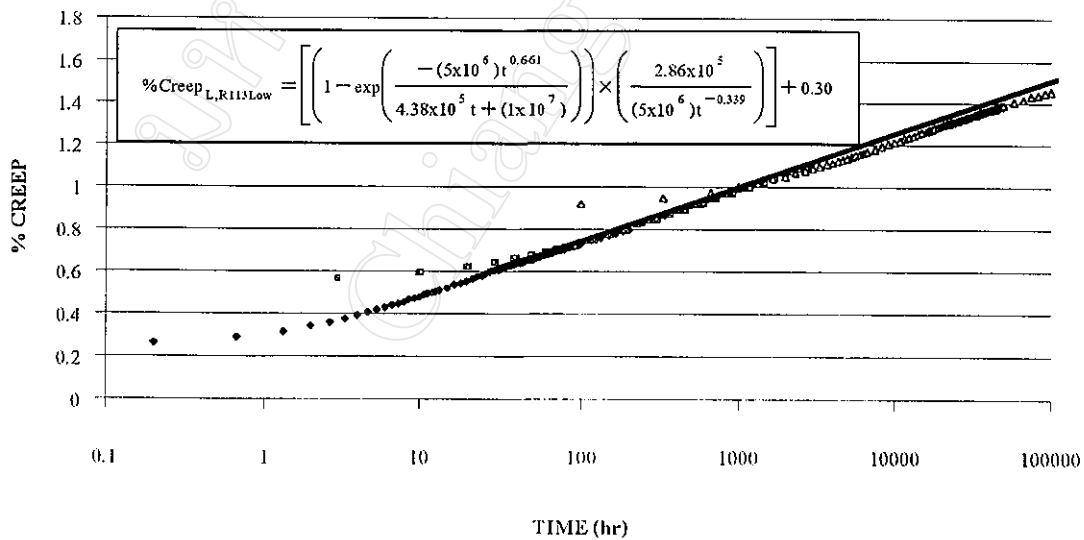
รูปที่ 4.31 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 60 °C



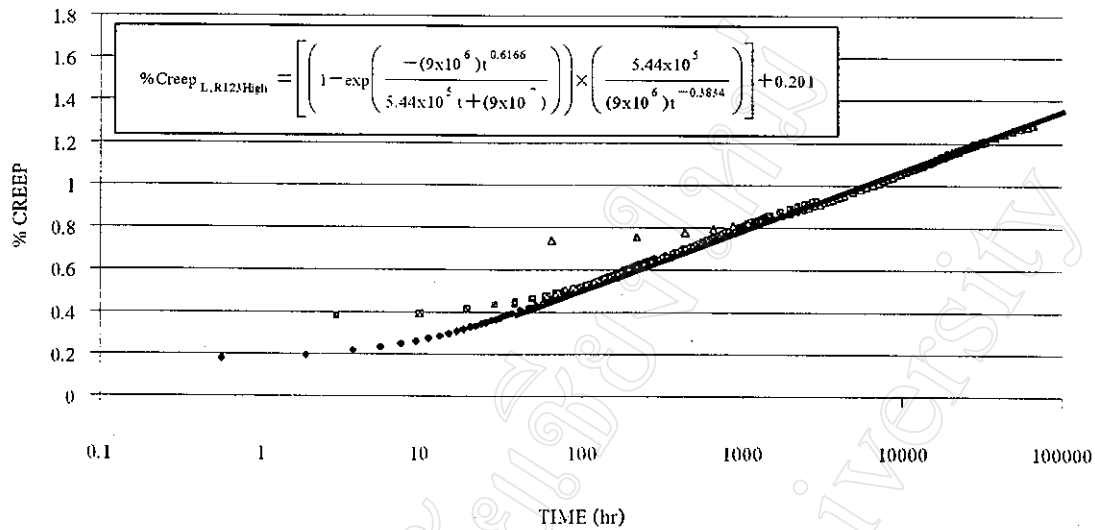
รูปที่ 4.32 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 60 °C



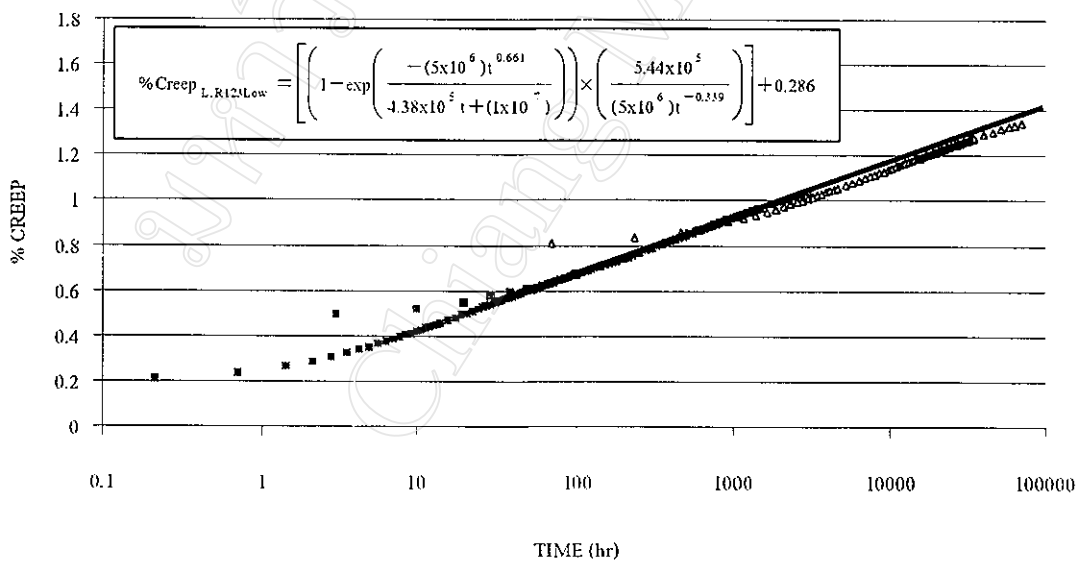
รูปที่ 4.33 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาว
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 4.34 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาว
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 4.35 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาวของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 60 °C



รูปที่ 4.36 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาวของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 60 °C

และเมื่อนำข้อมูลจากแบบจำลองมาสร้างสมการของเส้นกราฟการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 40 °C โดยเลือกขอบเขตของช่วงที่จะนำมาสร้างสมการ คือ เวลาทำงานในช่วง 0-3000 ชั่วโมง และอุณหภูมิทำงาน 40 60 และ 80 °C ของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูง ด้านรัศมี และนำสมการทั้ง 3 มาหาความสัมพันธ์ เพื่อสร้างสมการทั่วไปของการเกิดการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{D,R113High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(1 \times 10^7)t^{0.5172}}{3.87 \times 10^5 t + (1 \times 10^8)} \right) \right) \times \left(\frac{2.97 \times 10^5}{(1 \times 10^7)t^{-0.428}} \right) \right] + 0.1655 \quad (4.16)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพารามิเตอร์ความถี่สูง ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{D,R113Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(6 \times 10^6)t^{0.6219}}{3.58 \times 10^5 t + (6 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{2.97 \times 10^5}{(6 \times 10^6)t^{-0.3781}} \right) \right] + 0.41885 \quad (4.17)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพารามิเตอร์ความถี่สูง ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R113High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(1 \times 10^7)t^{0.5172}}{3.87 \times 10^5 t + (1 \times 10^8)} \right) \right) \times \left(\frac{1.49 \times 10^5}{(1 \times 10^7)t^{-0.428}} \right) \right] + 0.1655 \quad (4.18)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพารามิเตอร์ความถี่สูง ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{L,R113Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(6 \times 10^6)t^{0.6219}}{3.58 \times 10^5 t + (6 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{1.49 \times 10^5}{(6 \times 10^6)t^{-0.3781}} \right) \right] + 0.248 \quad (4.19)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนสูง ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

$$\%Creep_{D,R123High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(1 \times 10^7)t^{0.5172}}{3.87 \times 10^5 t + (1 \times 10^8)} \right) \right) \times \left(\frac{5.88 \times 10^5}{(1 \times 10^7)t^{-0.428}} \right) \right] + 0.1655 \quad (4.20)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนต่ำ ด้านรัศมี ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\%Creep_{D,R123Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(6 \times 10^6)t^{0.6219}}{3.58 \times 10^5 t + (6 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{5.88 \times 10^5}{(6 \times 10^6)t^{-0.3781}} \right) \right] + 0.255 \quad (4.21)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนสูง ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

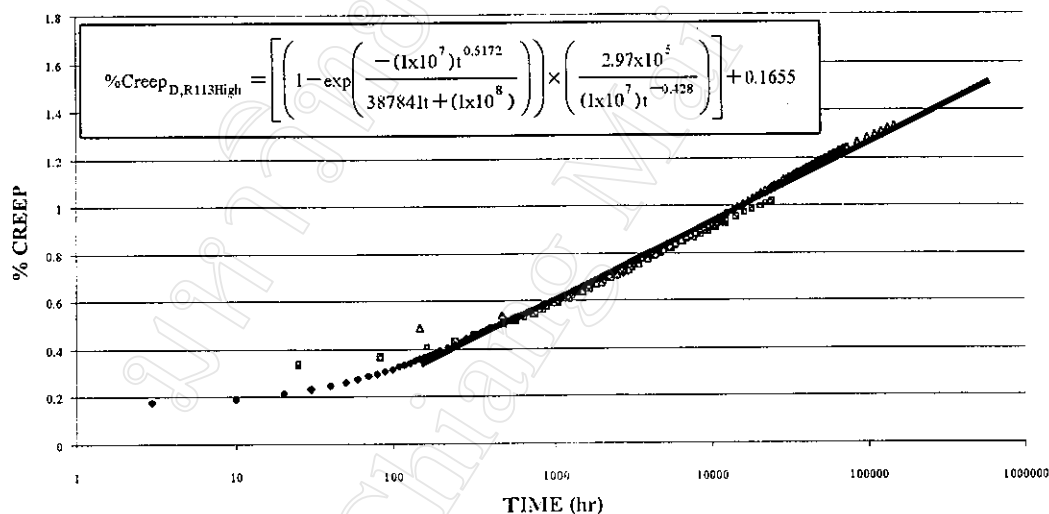
$$\%Creep_{L,R123High} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(1 \times 10^7)t^{0.5172}}{3.87 \times 10^5 t + (1 \times 10^8)} \right) \right) \times \left(\frac{2.94 \times 10^5}{(1 \times 10^7)t^{-0.428}} \right) \right] + 0.168 \quad (4.22)$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ของสมการเส้นโค้งของข้อมูลการคืบที่แต่ละอุณหภูมิ ที่ค่าพลักซ์ความร้อนต่ำ ด้านความยาว ของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 และสามารถสร้างสมการทั่วไปของการคืบของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ที่อุณหภูมิ 40 °C ในเทอมของเวลาในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้

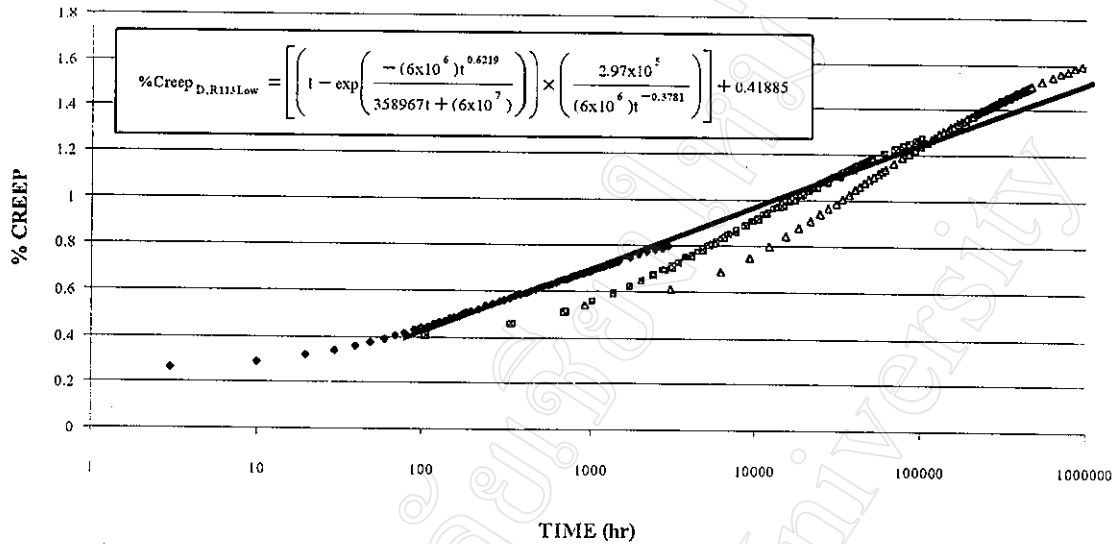
$$\%Creep_{L,R123Low} = \left[\left(1 - \exp \left(\frac{-(6 \times 10^6)t^{0.6219}}{3.58 \times 10^5 t + (6 \times 10^7)} \right) \right) \times \left(\frac{2.94 \times 10^5}{(6 \times 10^6)t^{-0.3781}} \right) \right] + 0.196 \quad (4.23)$$

สมการทั่วไปของสมการที่ (4.16) ถึง (4.23) ดังแสดงในรูป 4.37 ถึง 4.44 และตัวคูณเลื่อนค่า a_r สำหรับสมการที่ (4.8) ถึง (4.23) ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตาราง ข.11 ถึง ข.14

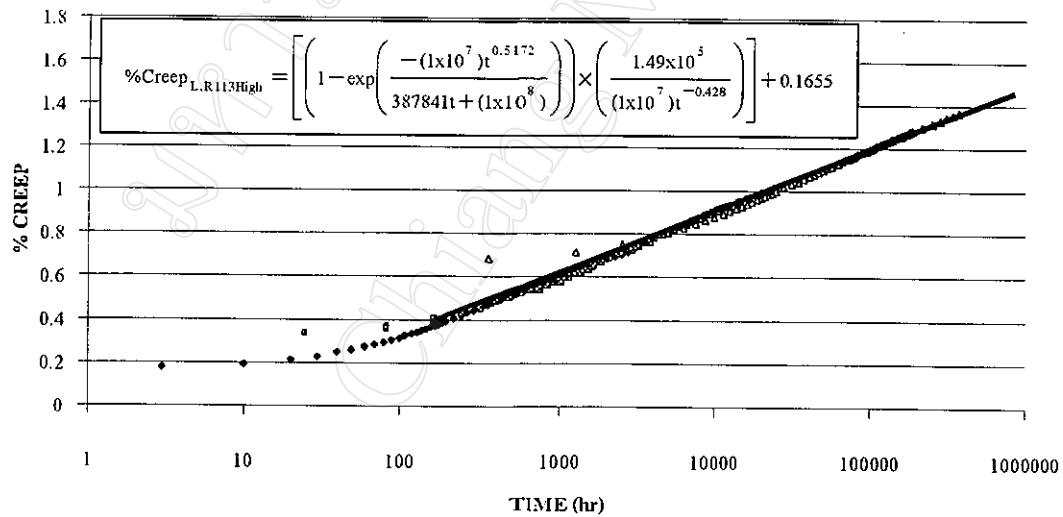
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการคืบกับเวลาที่ได้จากการปรับสเกลเวลา แล้วที่อุณหภูมิ 60 และ 40 °C ที่สภาวะต่างๆ ดังแสดงในรูป 4.27 ถึง 4.34 และ 4.35 ถึง 4.42 ตามลำดับ จะเห็นว่าหากกำหนดว่าในการใช้งานท่อเทอร์โมไซฟอน การคืบของท่อต้องไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ท่อพลาสติกชนิดเอชดีพีอีที่ใช้ สามารถใช้งานได้จนถึงประมาณ 10000 ชั่วโมง หรือประมาณ 1.14 ปี อย่างไรก็ตามในการกำหนดอายุการใช้งานท่อเทอร์โมไซฟอนยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆอีกเช่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งถ่ายความร้อน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างท่อและสารทำงาน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับก๊าซที่ไม่ควมแน่นในท่อ เป็นต้น ซึ่งสมควร ได้รับความศึกษาต่อไป



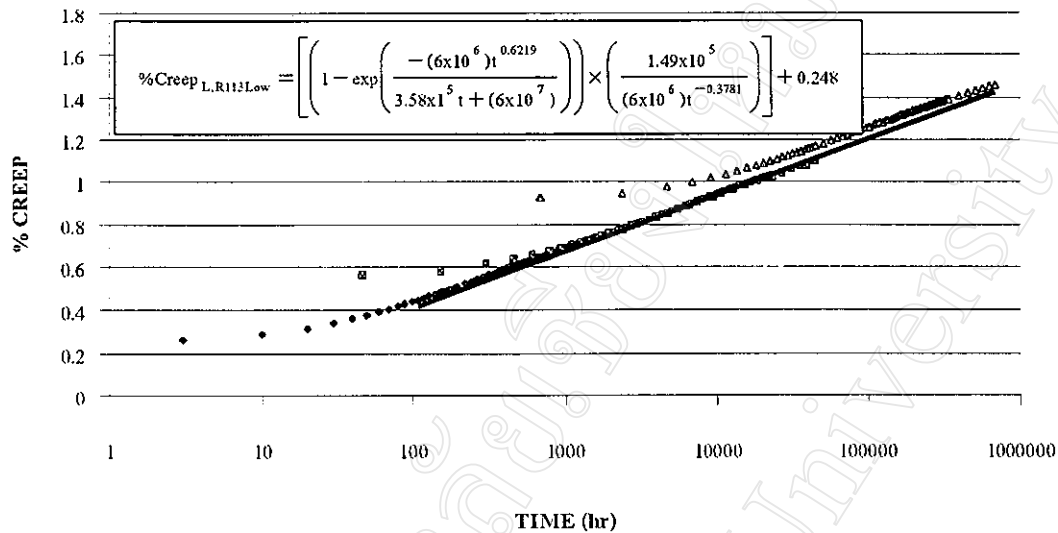
รูปที่ 4.37 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ปล่อยความร้อนที่ส่วนควมแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 40 °C



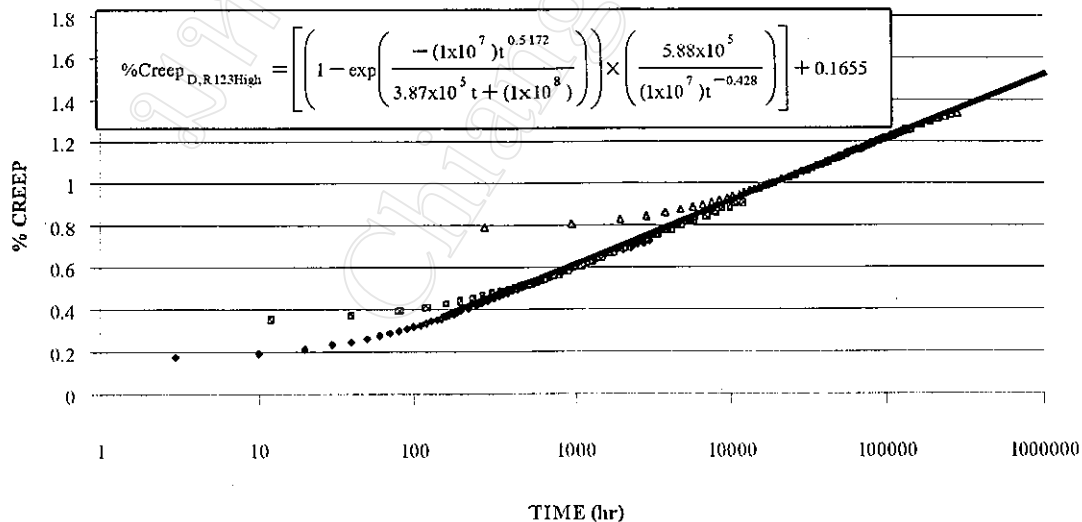
รูปที่ 4.38 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 40 °C



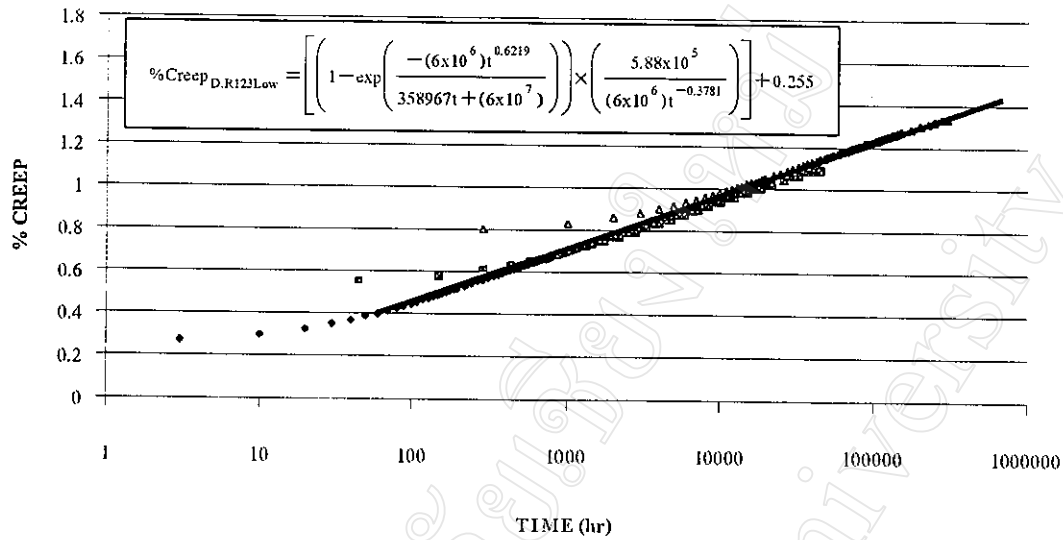
รูปที่ 4.39 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาว
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 40 °C



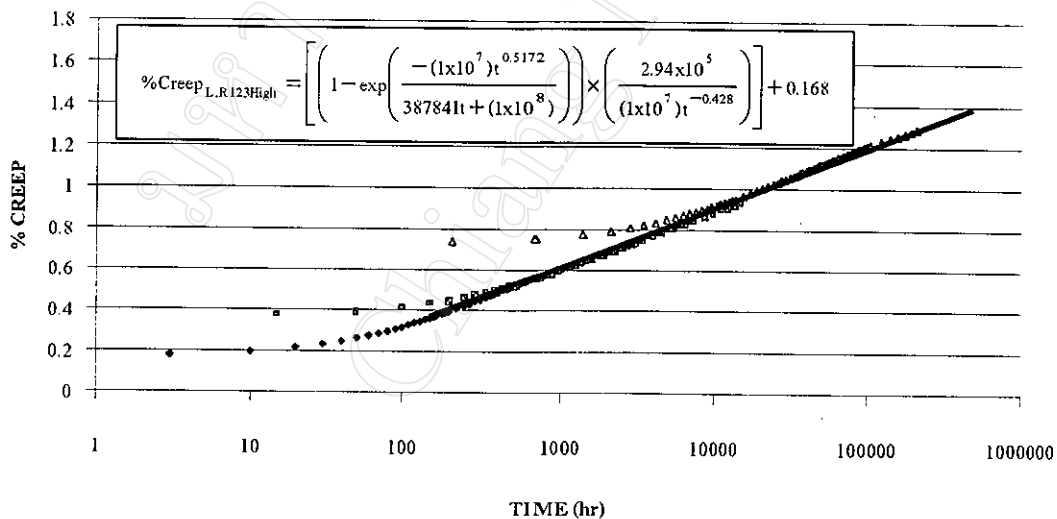
รูปที่ 4.40 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาวของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R113 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 40 °C



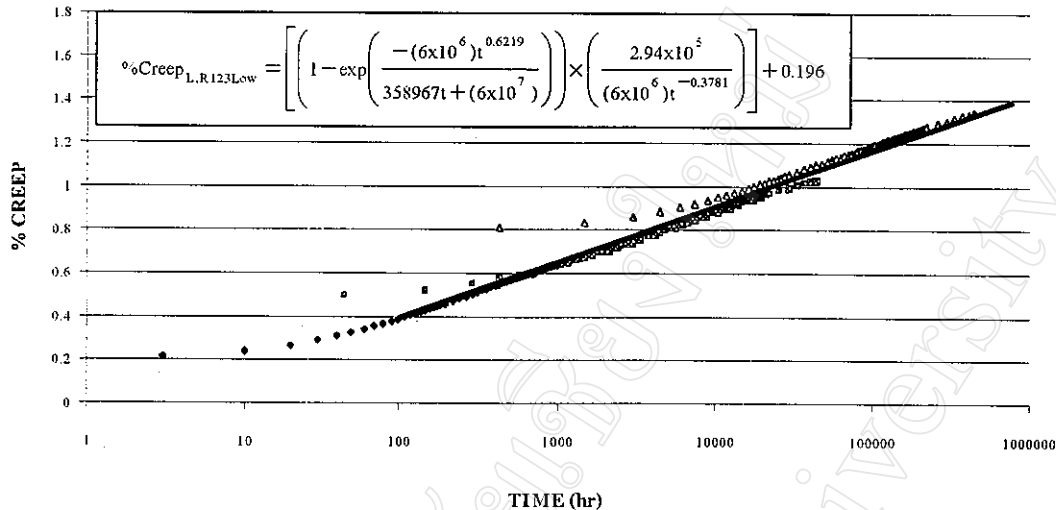
รูปที่ 4.41 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมีของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 4.42 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านรัศมี ของท่อทดสอบ
ที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 40 °C



รูปที่ 4.43 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาว
ของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 ฟลักซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นสูง ที่อุณหภูมิ 40 °C



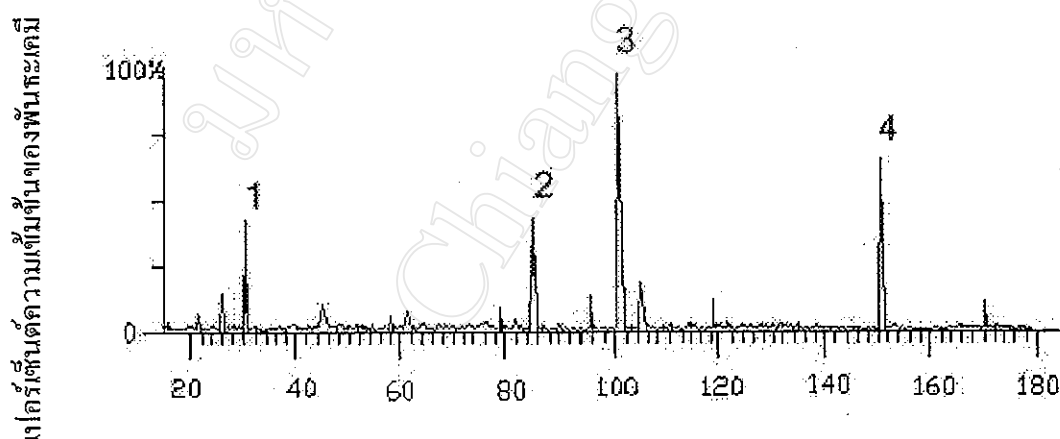
รูปที่ 4.44 แสดงผลจากการใช้แบบจำลองของ ซินาร์ ทำนายการคืบด้านความยาวของท่อทดสอบที่ใช้สารทำงาน R123 พลิกซ์ความร้อนที่ส่วนควบแน่นต่ำ ที่อุณหภูมิ 40 °C

4.2 ผลการทดสอบสารทำเย็น

ผลการทดสอบสารทำเย็นเพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของธาตุหรือองค์ประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ของสารทำเย็นที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอาจจะเป็นผลเนื่องจากหลายปัจจัยเช่น ช่วงเวลาในการทดสอบ อุณหภูมิการทดสอบ ชนิดของสารทำงาน ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยการวิเคราะห์สารทำเย็นด้วยวิธีการ Gas Chromatography -Mass Spectrometry (GC-MS) เพื่อหาความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีว่ามีเปลี่ยนแปลงไปจากสารมาตรฐานหรือไม่

รูป 4.45 ถึง 4.46 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) และ รูป 4.47 ถึง รูป 4.48 แสดงแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของสารทำเย็น R113 และ R123 มาตรฐานก่อนเริ่มต้นการทดลอง ตามลำดับจะเห็นว่าโครมาโทแกรม และแมสสเปกตรัม มีลักษณะเป็นยอดแหลมชี้ขึ้นด้านบน (Peak) โดยที่ยอดแหลมแต่ละยอดจะแสดงชนิดของพันธะแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติการระเหยกลายเป็นไอ และความไวต่อก๊าซต่างกัน โดยที่แกนตั้งจะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของพันธะเคมี และในแกนนอนจะแสดงถึงเลขลำดับของพันธะของโมเลกุล จากโครมาโทแกรมนั้นถ้าต้องการพิจารณาชนิดของพันธะที่ตรวจพบนั้นจะต้องใช้ความชำนาญ และเวลาในการเปิดตารางเทียบผลเป็นอย่างมาก จึงใช้แมสสเปกตรัมเพื่อดูชนิดของพันธะแทน จากการระบุชนิดของสารมาตรฐาน

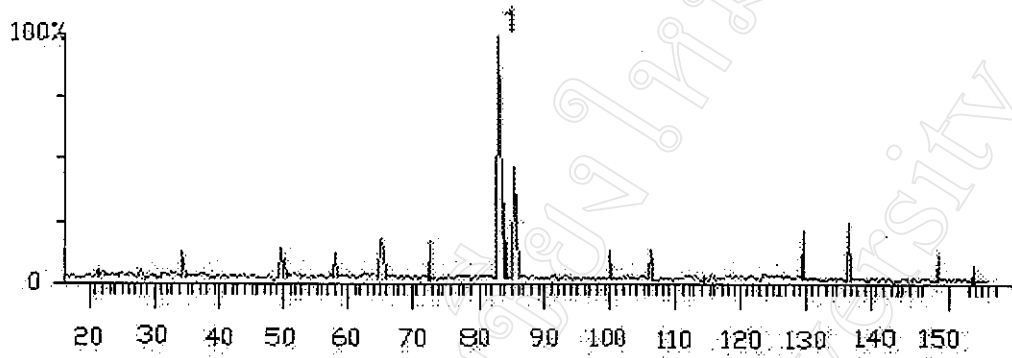
โดยใช้เครื่อง GC-MS มาตัดสิน จากแมสสเปกตรัม ของสารทำเย็น R113 ก่อนเริ่มการทดสอบจะมี ยอดแหลมที่แสดงเลขมวลโมเลกุล อยู่ 4 ยอด คือยอดที่มีมวลโมเลกุล 31, 85, 101 และ 151 ตามลำดับ ดังรูป 4.47 ได้แกสารที่ประกอบไปด้วยพันธะ C-F, C-F₂-Cl, C-F-Cl₂, C₂-F₃-Cl₂ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของพันธะหลักที่สำคัญแล้วพบว่าเป็น Ethane,1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro มีความสอดคล้องกับชื่อทางเคมีของสารประกอบ 1,1,2-trichlorotrifluoroethane (CCl₂FCFClF₂) โดยข้อมูลที่ได้มีความน่าจะเป็น 98.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฐานข้อมูล (Data Base) ของเครื่อง GC-MS ส่วนสารทำเย็น R123 ก่อนเริ่มการทดสอบจะมียอดแหลมที่แสดงเลขมวลโมเลกุล อยู่ 1 ยอด คือยอดที่แสดงสารที่มี มวลโมเลกุล 83 คือสารที่ประกอบไปด้วยพันธะ C-F₂-Cl และ ยอดข้างเคียงที่ไม่สามารถระบุได้อีก 1 ยอด ดังรูป 4.48 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของพันธะหลักที่สำคัญแล้วจะพบว่าเป็น Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro ซึ่งสอดคล้องกับชื่อทางเคมีของสารประกอบคือ 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane (CHCl₂CF₃) แต่ในการทำ GC-MS ของสารทำเย็น R123 นั้นจะพบยอดแหลมที่มีมวลโมเลกุล 83 เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าเป็น Isotope ของ Cl ซึ่ง Isotope ของ Cl นี้จะเป็นพันธะของ Cl ที่มีมวลโมเลกุลที่ไม่เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้พันธะของ Cl นี้ไม่ได้แสดงเลขมวลโมเลกุล โดยข้อมูลที่ได้มีความน่าจะเป็น 93.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลของเครื่อง GC-MS โดยแต่ละยอดแหลมที่สามารถบอกชนิดของสารทำงานได้นั้น มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของพันธะเคมีเกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงยึดเอาเกณฑ์ที่ 25 เปอร์เซ็นต์เป็นดัชนีบ่งบอกถึงความเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารที่ทำการทดสอบ (ไพฑูรย์ ทรัพย์อุดม., 2544)



ลำดับพันธะของมวลโมเลกุล

รูป 4.45 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R113 มาตรฐาน

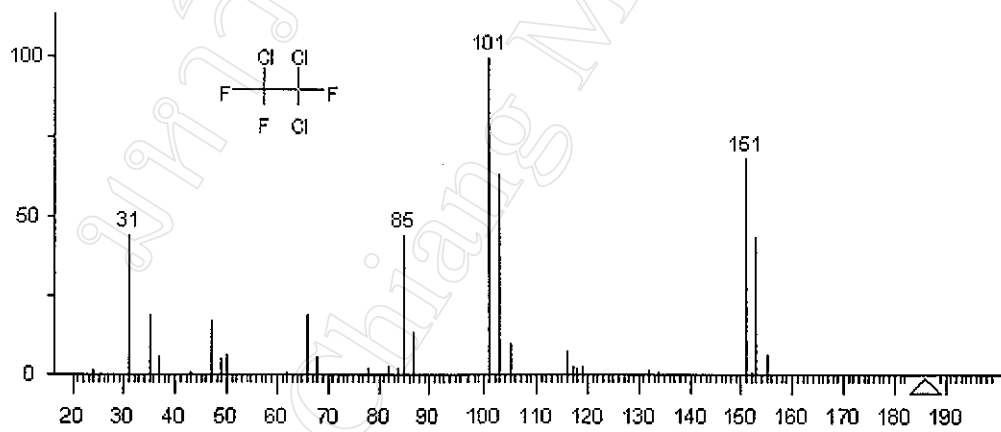
แก๊สโครมาโตกราฟี



ลำดับขั้นของมวลโมเลกุล

รูป4.46 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R123 มาตรฐาน

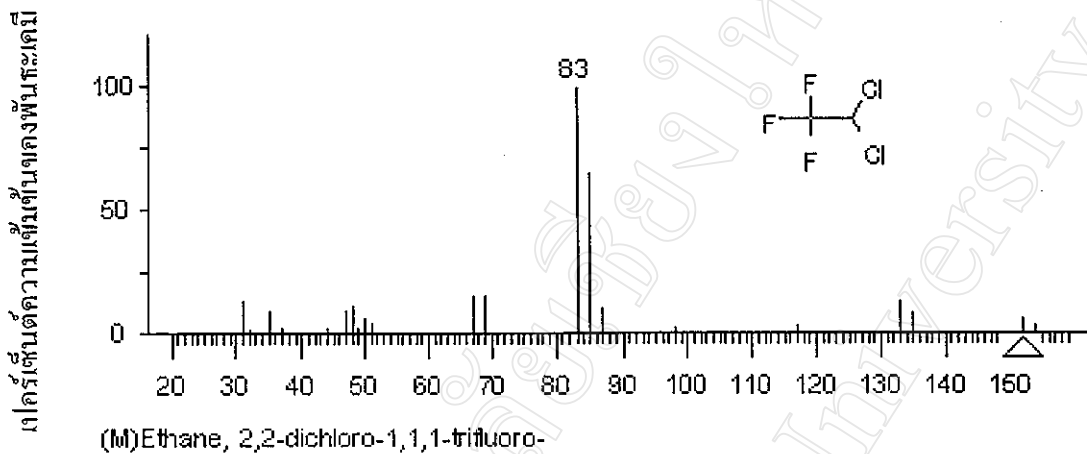
แก๊สโครมาโตกราฟี



(M)Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-

ลำดับขั้นของมวลโมเลกุล

รูป4.47 แสดง แมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของสารทำเย็น R113 มาตรฐาน

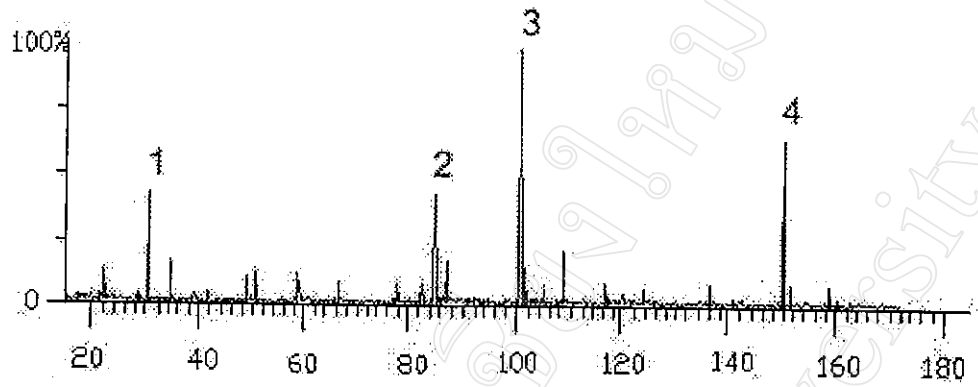


ลำดับพีคพีระเคมีของมวลโมเลกุล

รูป 4.48 แสดง แมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของสารทำเย็น R123 มาตรฐาน

เมื่อได้ข้อมูลในการวิเคราะห์เปรียบเทียบสารทำเย็นแต่ละชนิดแล้วว่า มีข้อหลักที่ยึด และ เป็นอะไรบ้าง ดังนั้นเมื่อเอาผลจากการทดสอบมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูป 4.47 และ 4.48 แสดง โครมาโทแกรมของสารทำเย็น R113 และ R123 เมื่อผ่านการทดสอบในขวดแก้วปิดสนิทที่แช่อยู่ใน ทารายร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง โดยจะยึดยึดหลักของพีคหลักของสารทำเย็น R113 และ R123 มาตรฐานที่ได้จากการทำ GC-MS ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของพีระเคมีที่เกิน กว่า 25 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นมาพิจารณา แต่เนื่องจากการตรวจสอบโดยใช้เทคนิค GC-MS จะต้องใช้บ ปรมาณในการตรวจสอบสูงมาก และจากข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างสารทำงานทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 80 °C (2 ตัวอย่าง) ไม่พบยอดแหลมที่แตกต่างเกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์สารทำงานที่ ทดสอบตามอุณหภูมิการทดสอบทั้ง 3 จะตรวจสอบเฉพาะเทคนิค GC เพียงอย่างเดียวเพื่อหาข้อค แลหมที่แตกต่างของข้อมูลที่เกิดขึ้นค่าที่สำคัญ 25 เปอร์เซ็นต์ หากพบว่าเกินกว่าค่านี้สำคัญนี้จะทำการ ตรวจสอบด้วย GC-MS อีกครั้งหนึ่ง

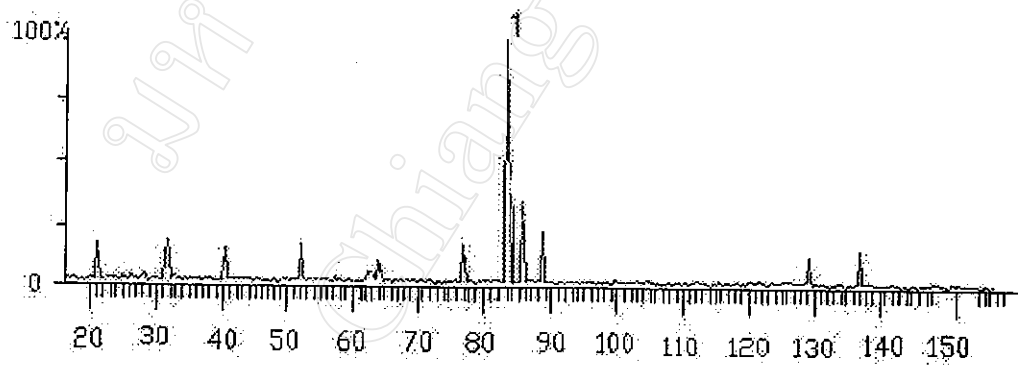
แก๊สที่ตรวจพบในตัวอย่างพืช



ลำดับพีคของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.49 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R113
ทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

แก๊สที่ตรวจพบในตัวอย่างพืช

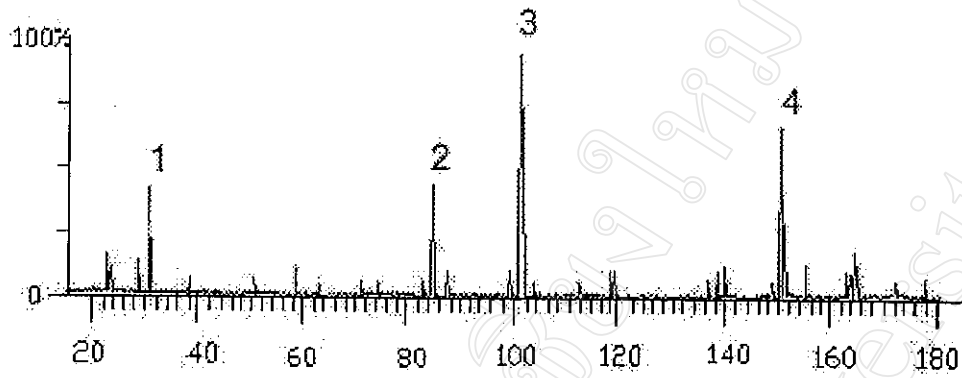


ลำดับพีคของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.50 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R123
ทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

รูป 4.51 ถึง 4.54 แสดงผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 และ 60 °C ที่ผ่านการทดสอบเป็นเวลา 3000 ชั่วโมง ของสารทำเย็น R113 และ R123 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่าไม่มียอดของพันธะไดคานนอกเหนือจากพันธะหลัก ที่มีค่าปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของพันธะเคมีที่เกินกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ และเลขคลื่นของพันธะหลักก็ไม่มีแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบยอดแหลมของพันธะหลักๆของสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวกับแล้วปรากฏว่ายอดแหลมของพันธะหลักยังมีอยู่ครบแต่มีความแตกต่างของความเข้มข้นของพันธะเคมีอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งการที่ความเข้มข้นของยอดแหลมที่แตกต่างกันไปอย่างไม่มีนัยสำคัญนี้เกิดจากการที่สารทำเย็นที่นำมาวิเคราะห์มีจุดเดือดต่ำ ($R113 = 47.56\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R123 = 27.84\text{ }^{\circ}\text{C}$) และสามารถระเหยตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิทำงานของเครื่อง GC ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมปริมาณสารตัวอย่างในการวิเคราะห์ GC ให้เท่ากันในทุกครั้งที่ทดสอบได้ ตำแหน่งและความเข้มข้นของยอดแหลมที่ปรากฏออกมาจึงแตกต่างกัน และถ้าพิจารณายอดแหลมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ถือว่าเป็นสิ่งแปลกปลอมนอกเหนือจากสารมาตรฐานหรือไม่ ถ้าเป็นสิ่งแปลกปลอมที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบจริงจะเป็นที่ยอดแหลมซึ่งมีลำดับพันธะของมวลโมเลกุลเดียวกันเสมอ และเมื่อเทียบโครมาโทแกรมของสารทำเย็นที่ทุกสภาวะทดสอบแล้วจะพบว่ายอดแหลมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์นั้นไม่มีลำดับพันธะของมวลโมเลกุลที่ตรงกันเลย ดังนั้นจึงสรุปจากโครมาโทแกรมของสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดได้ว่าไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงใดๆของตำแหน่งและความเข้มข้นของพันธะเคมีของสารทำเย็น R113 และ R123 นั่นคือสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำงานที่เวลา 3000 ชั่วโมง และอุณหภูมิทำงานไม่เกิน 80 °C ส่วนผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 และ 60 °C ของสารทำเย็น R113 และ R123 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน

แปลอร์เส้นความเข้มของพื้นที่

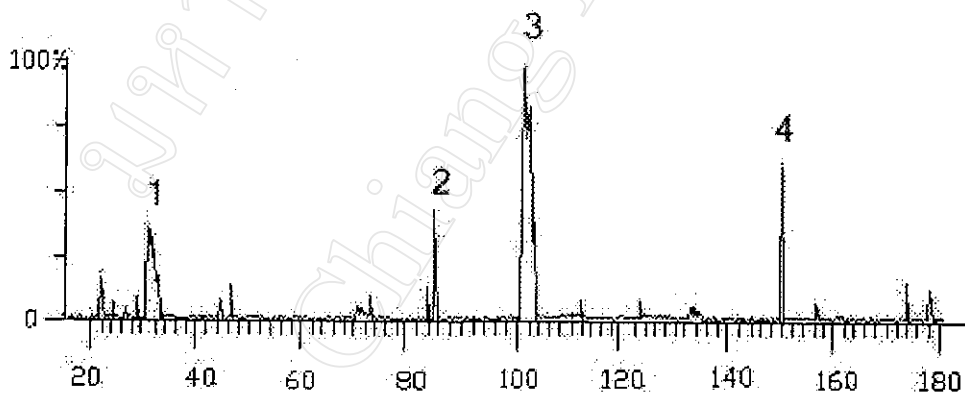


ลำดับพื้นที่ของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.51 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R113

ทดสอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

แปลอร์เส้นความเข้มของพื้นที่

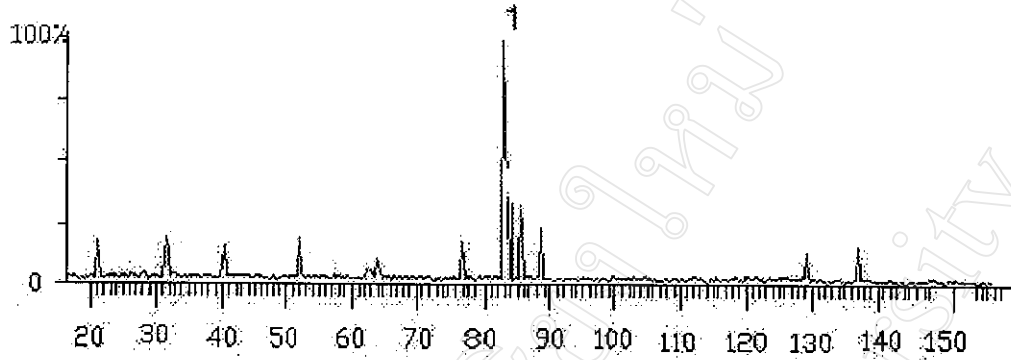


ลำดับพื้นที่ของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.52 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R113

ทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

แปลร้แสดงค่าความเข้มของพีคแต่ละคัม

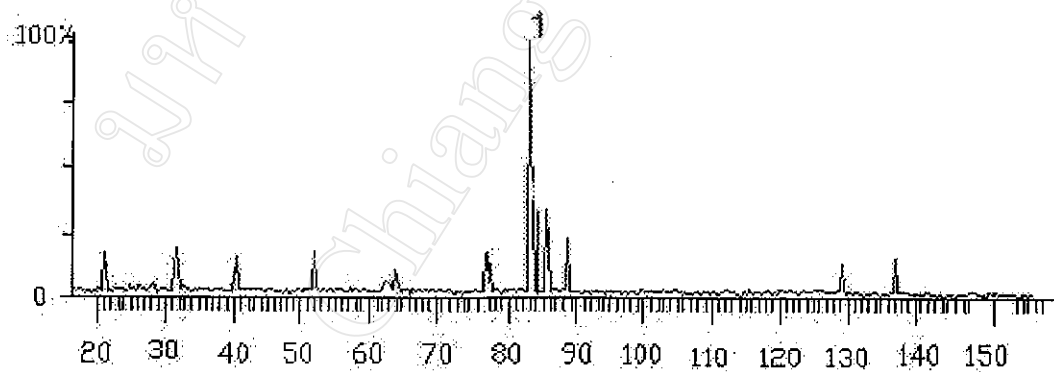


ลำดับพีคของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.53 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R123

ทดสอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง

แปลร้แสดงค่าความเข้มของพีคแต่ละคัม



ลำดับพีคของมวลโมเลกุล

รูปที่ 4.54 แสดงโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R123

ทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง