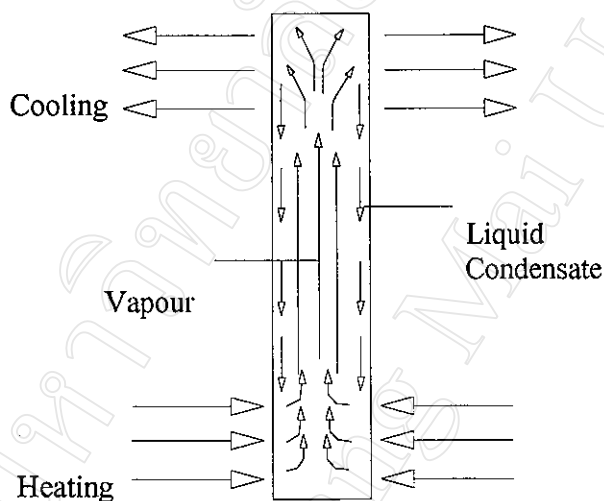


## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน

เทอร์โมไซฟอน คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก (ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2541) ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำเย็นภายในท่อ ซึ่งระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนจากการควบแน่นให้กับแหล่งรับความร้อน รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอนซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำเย็นอยู่ภายในท่อ เทอร์โมไซฟอนมีลักษณะเป็นท่อระบบปิดซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือส่วนทำระเหย (Evaporator section) ส่วนฉนวน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section)



รูปที่ 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน

ที่มา : Engineering Science Data Unit (1981)

หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน คือ ความร้อนจากส่วนทำระเหยจะทำให้สารทำเย็นซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิมิตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและลอยขึ้นไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดการควบแน่นและไหลกลับลงสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำเย็นมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำเย็นจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นแตกต่างกัน

เพียงเล็กน้อย เนื่องจากเทอร์โมโซฟอนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการส่งผ่านความร้อนสูง ดังนั้นจึงมีการนำเทอร์โมโซฟอนไปประยุกต์ใช้กับระบบประหยัดพลังงาน เช่น นำไปใช้ให้กับเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer) หอกลับแบบกัลความร้อน (Reboiler) หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) และในระบบที่มีความต้องการการระบายความร้อนของอุปกรณ์บางชนิดก็สามารถนำเครื่องมือส่งผ่านความร้อนชนิดนี้ไปใช้งานได้ เช่น การระบายความร้อนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้แต่การนำไปใช้ในการรักษาความสมดุลของอุณหภูมิบนดาวเทียมได้อีกด้วย

## 2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุท่อ (Mechanical Properties of Pipe Materials)

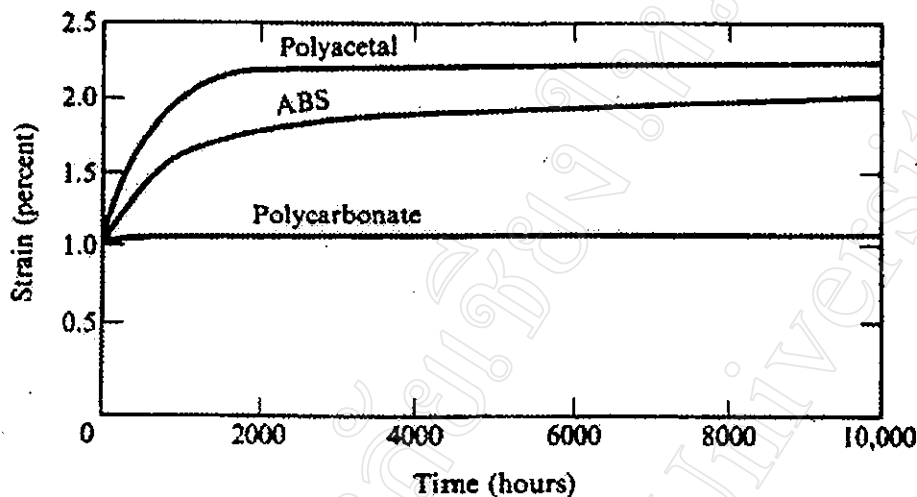
### การคืบ (Creep) ของวัสดุ

วัสดุทุกชนิดรวมทั้งพลาสติกจะเกิดการคืบได้ การคืบคือความเครียดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างช้าๆภายใต้ภาระที่คงที่ ซึ่งขึ้นกับตัวแปรหลายชนิดเช่น เวลา อุณหภูมิ และความดันเป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมการคืบได้อย่างง่ายคือ เมื่อเราใส่น้ำหนักถ่วงแก่วัสดุโดยให้แรงอย่างคงที่ และต่อเนื้อวัสดุจะเกิดความเค้น (Stress) ขึ้นภายในเนื้อวัสดุทำให้วัสดุนั้นเกิดการยืดขึ้น และเมื่อเราปล่อยน้ำหนักที่ถ่วงออกวัสดุนั้นก็จะไม่สามารถหดกลับไปเท่าเดิมได้อีก ซึ่งการคืบที่เวลาที่กำหนดจะมีค่าเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงความยาวไปจากเดิมภายหลังจากที่ได้รับแรงภายนอกมากระทำ หากด้วยความยาวเดิม การยืดจากการคืบมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิมที่ไม่มีการยืด

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \epsilon_{\text{Creep}} &= (L - L_0) / L_0 & (2.1) \\ \text{เมื่อ } \epsilon_{\text{creep}} &= \text{ความเครียดเนื่องจากการคืบ} \\ L &= \text{ความยาวใหม่ภายหลังจากที่ได้รับแรงภายนอกมากระทำ} \\ L_0 &= \text{ความยาวเดิม หรือความยาวปกติของวัสดุ} \end{aligned}$$

สำหรับหน่วยของการคืบนั้นไม่นิยมระบุหรือกำกับ เพราะมีหน่วยเป็นความยาวต่อความยาวซึ่งตัดกันเอง และนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของการคืบ

ในการทดสอบเกี่ยวกับการคืบนั้นจะทำให้ค่าความเค้นค่าหนึ่ง และอุณหภูมิหนึ่ง และมีการกำหนดช่วงเวลาสำหรับการทดสอบวัดค่าความเครียดในช่วงเวลาต่างๆ และเขียนกราฟความเครียดเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูป 2.2



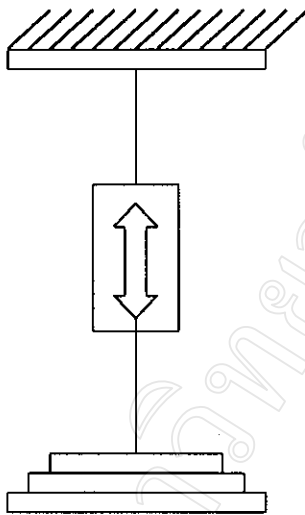
รูปที่ 2.2 แสดงการคืบของเทอร์โมพลาสติก 3 ชนิดที่ 3000 psi และ 23 °C  
ที่มา : นิตินัน จิระอรุณ. (2540)

ในขณะที่ทำการทดสอบหาการคืบนั้นสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องคอยสังเกตรอยแตกร้าวของผิวที่ทดสอบด้วยเพราะในการใช้งานนั้นที่ทดสอบจะต้องรับความดัน และอุณหภูมิที่สูงอยู่ตลอดเวลา ถ้าที่ทดสอบเกิดมีรอยแตกร้าวแล้วจะทำให้ที่เทอร์โมไซฟอนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป

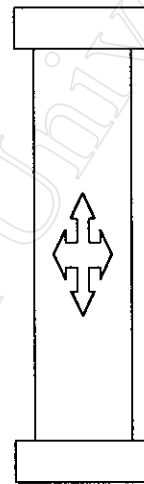
#### การคืบของวัสดุพลาสติก

ในการออกแบบทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพลาสติกที่รับแรงคงที่ดังในกรณีของเทอร์โมไซฟอน จุดมุ่งหมายในการออกแบบคือการหาค่าความเค้นที่ทำให้พลาสติกเสียรูปเกินค่าที่ยอมรับได้ มากกว่าเป็นการหาค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุขาด (Fracture) ดังที่นิยมใช้ในกรณีของโลหะ พลาสติกเป็นวัสดุประเภท วิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ซึ่งหมายความว่าความเค้น หรือความเครียดของพลาสติกเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลา ด้วยเหตุนี้ค่าโมดูลัสของพลาสติกจึงเป็นค่าที่ไม่คงที่ ดังนั้นค่าโมดูลัสของพลาสติกจึงต้องเป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบที่กระทำในช่วงเวลาที่ยาวนาน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากพฤติกรรมการคืบของพลาสติกสามารถนำไปใช้ช่วยในการคำนวณออกแบบทางวิศวกรรมได้

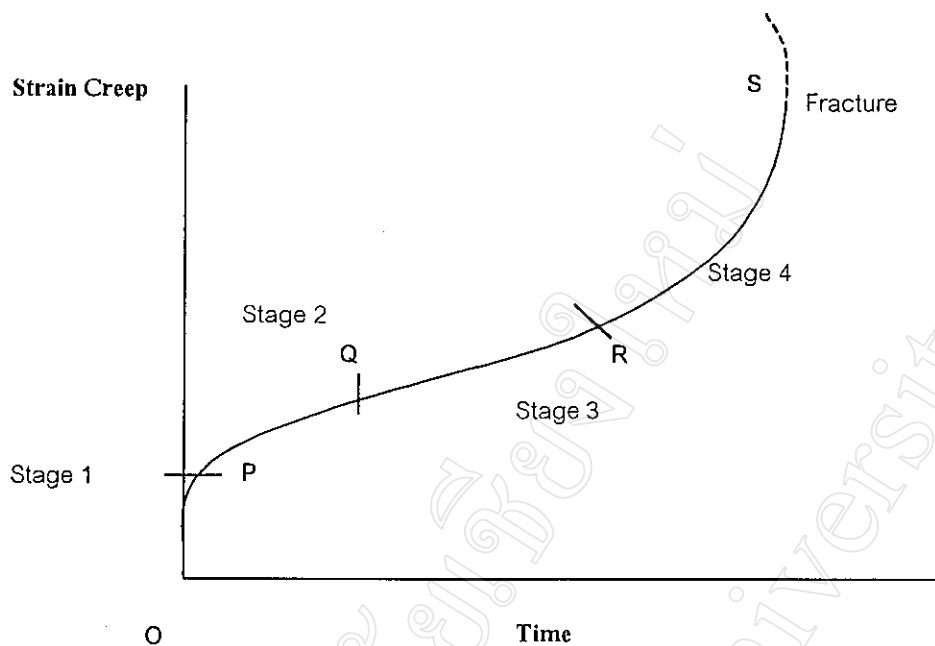
ในการทดสอบการคืบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ความเครียดที่เปลี่ยนไปตามเวลาของพลาสติก ภายใต้แรงกระทำที่คงที่ จะได้รับการบันทึกและแสดงผลในรูปแบบตารางและกราฟ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบต่างๆ โดยปกติแกนแสดงเวลานิยมให้อยู่ในรูปของ log scale เพื่อที่จะสามารถแสดงผลของเวลาได้ยาวนานบนกราฟ และเพื่อช่วยในการ extrapolate ต่อไป สำหรับท่อเทอร์โมโซโฟน พลาสติกความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งในแนวแกนและแนวรัศมีภายใต้ความดันคงที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 จะเป็นความเครียดที่เกิดขึ้นในท่อทดสอบที่ทำการศึกษา เนื่องจากคุณสมบัติของท่อพลาสติกเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง (Anisotropics) ซึ่งพฤติกรรมการเกิดการคืบของวัสดุพลาสติกทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือ



รูปที่ 2.3 การเกิดการคืบในเนื้อวัสดุ  
ที่มา : นิทัศน์ จิระอรุณ (2540)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการเกิดการคืบภายในท่อ  
เทอร์โมโซโฟนพลาสติก



รูปที่ 2.5 ลักษณะ Creep Curve ของพลาสติกทั่วไป

ที่มา : Shah (1984)

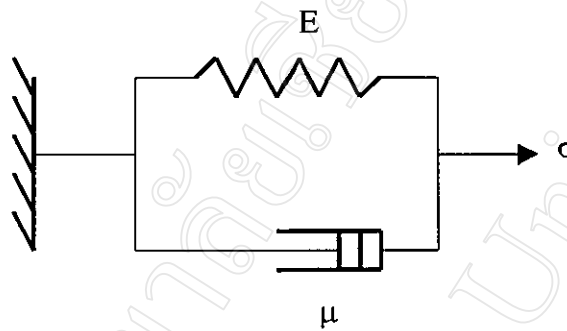
ก. ช่วง OP เรียกว่าช่วงแรก (Primary stage) จะเป็นช่วงที่พลาสติกเกิดการยืดขึ้น โดยที่จะอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic) คือเมื่อพลาสติกได้รับความเค้นแล้วจะเกิดความเครียดขึ้นโดยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยอัตราการเกิดจะไม่ขึ้นกับเวลา และถ้าเราหยุดให้ความเค้นแล้ว พลาสติกจะเกิดการหดตัวเข้ามาได้บางส่วน

ข. ช่วง PQ เรียกว่าช่วงที่สอง (Secondary stage) ในช่วงนี้อัตราการเกิดความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง คือเมื่อพลาสติกได้รับความเค้นต่อไปอีกอัตราการเกิดความเครียด ก็จะเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าช่วงแรก ถ้าพลาสติกได้รับความเค้น ถึงช่วงนี้แล้วเราหยุดให้ความเค้น พลาสติกก็จะไม่มีการหดกลับไปได้อีก

ค. ช่วง QR เรียกว่าช่วงที่สาม (Tertiary stage) ในช่วงนี้อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่คงที่ถึงเส้นตรงในช่วงนี้พลาสติกจะได้รับความเค้นต่อไปจนวัสดุนั้นเกิดการยืดไปคล้ายหมากฝรั่งซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การไหลเย็น (Cold flow)

ง. ช่วง RS เรียกว่าช่วงสุดท้าย (Final stage) ในช่วงนี้อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยการยืดจะเลยช่วงการไหลเย็น ไปแล้วและจะยืดต่อไปจนกระทั่งพลาสติกนั้นขาดออกจากกันที่จุด S ซึ่งจุดนี้เราเรียกว่า จุดขาด (Fracture)

ในการศึกษาพฤติกรรมการคืบนั้นจะนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อมาทำนายพฤติกรรมของวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติก (Viscoelastics) โดยอาศัยพื้นฐานของสปริง และตัวหน่วงตามอุดมคติ (Birley et al., 1992) โดยที่สปริงจะใช้แทนการเสียรูปแบบยืดหยุ่น คือการคืนรูปทั้งหมดเมื่อเอาแรงกระตุ้นออก และตัวหน่วงจะใช้แทนวัสดุที่มีความเหนียวหนืด คือการไม่สามารถกลับคืนในรูปเดิมได้เมื่อเอาแรงกระตุ้นออก ซึ่งแบบจำลองนี้มีหลายชนิดด้วยกัน แต่ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้คือแบบจำลองไค-เคลวิน (Voigt-Kelvin Model) และแบบจำลองซีเนอร์ (Zener Model) รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองไค-เคลวิน โดยที่สัญลักษณ์  $\sigma$  แทนความเค้น  $E$  แทนค่าโมดูลัสของสปริง และ  $\mu$  แทนความหนืด



รูปที่ 2.6 แบบจำลองไค-เคลวิน

ที่มา : Birley et al. (1992)

จากแบบจำลองไค-เคลวิน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{ชิ้นส่วนสปริง} \quad \sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

$$\text{ชิ้นส่วนตัวหน่วง} \quad \sigma = \mu \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.3)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความเครียดในแต่ละชิ้นส่วน จะเท่ากับความเครียดรวม โดยความเค้นที่ให้แก่ถูกรองรับจากชิ้นส่วนของ สปริงและตัวหน่วง ดังนั้นจึงเขียนสมการได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon_E = \epsilon_V \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_V \quad (2.5)$$

แทนความเค้นจากสมการ (2.2) และ (2.3) ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$\sigma = \mu \cdot \frac{d\epsilon}{dt} + (E \cdot \epsilon) \quad (2.6)$$

หารด้วย  $E$  และจัดรูปใหม่จะได้

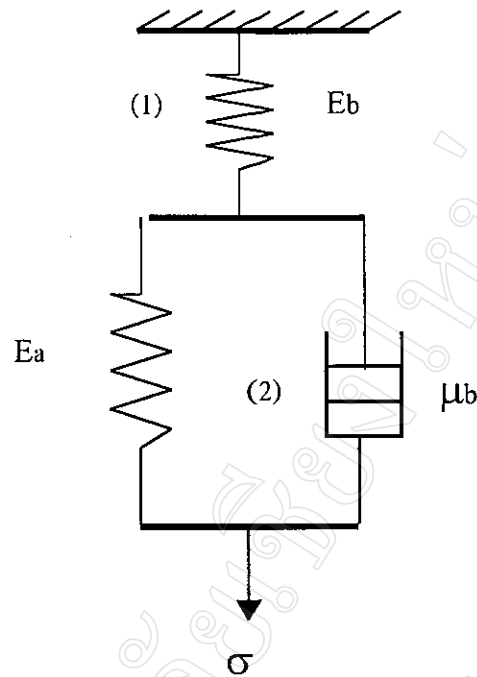
$$\int \frac{d\varepsilon}{(\sigma/E) - \varepsilon} = \frac{E}{\mu} \int dt$$

อินทิเกรต และใช้สภาวะ  $t = 0$  และ  $\varepsilon = 0$  (ค่าคงที่จากการอินทิเกรต จะเท่ากับ  $-\ln \sigma/E$ )

$$-\ln \left( \frac{\sigma}{E} - \varepsilon \right) + \ln \frac{\sigma}{E} = \frac{E}{\mu} t$$

$$\text{ดังนั้น } \varepsilon(t) = \left[ 1 - \exp \left( \frac{-Et}{\mu} \right) \right] \frac{\sigma}{E} \quad (2.7)$$

จากแบบจำลองไวค-เคลวิน จะอธิบายถึงพฤติกรรมการคืบเพื่อใช้ในการประมาณในขั้นต้นสำหรับการคืบภายใต้แรงกระทำอย่างคงที่ แต่ต้องการแบบจำลองที่มีความแม่นยำในการอธิบายการคืบนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนขึ้นโดยความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองที่รู้จักกันในชื่อแบบจำลองซินาร์ ซึ่งอาศัยพื้นฐานของสปริง และตัวหน่วงตามอุดมคติมาต่อขนาน และอนุกรมดังรูป 2.7 ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้เพื่อแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการไหลหนืดเชิงเส้นของวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก (Ward., 1983) โดยที่สัญลักษณ์  $\sigma_a$  แทนความเค้นของสปริง  $a$  ด้านซ้าย,  $\sigma_b$  แทนความเค้นของสปริง  $b$  ด้านขวา,  $E_a$  แทนค่าโมดูลัสของสปริง  $a$  ด้านซ้าย,  $E_b$  แทนค่าโมดูลัสของสปริง  $b$  ด้านขวา, และ  $\mu_b$  แทนความหนืด โดยที่จำนวนของ อิเลเมนต์ ที่ต่อเพิ่มนี้จะทำให้สมการมีจำนวนเทอมของตัวแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งรวมพฤติกรรมการเสียดรูปแบบ อีลาสติก ในช่วงแรกเข้าไปด้วย ทำให้ความถูกต้องในการอธิบายพฤติกรรมการคืบมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.7 แบบจำลองซีนาร์  
ที่มา : Ward (1983)

จาก แบบจำลองซีนาร์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_{b2} \quad (2.8)$$

$$\epsilon = \epsilon_{b1} + \epsilon_{b2} = \epsilon_a + \epsilon_{b1}, \quad \epsilon_a = \epsilon_{b2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{b1} = E_b \epsilon_{b1} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{b2} = \mu_b \frac{d\epsilon_{b2}}{dt} \quad (2.11)$$

$$\sigma_a = E_a \epsilon_a \quad (2.12)$$

แทนสมการ (2.11), (2.12) ลงใน (2.8) จะได้

$$\sigma = E_a \epsilon_a + \mu_b \frac{d\epsilon_{b2}}{dt} \quad (2.13)$$

$$\sigma = E_a \epsilon - \frac{E_a}{E_{b1}} \sigma + \mu_{b2} \frac{d\epsilon_b}{dt} - \frac{\mu_{b2}}{E_{b1}} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.14)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\sigma + \frac{\mu_{b2}}{E_{b1}} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_a}{E_{b1}} \sigma = E_a \varepsilon + \mu_{b2} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.15)$$

$$\frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} + \frac{\mu_{b2}}{E_a E_{b1}} \frac{d\sigma}{dt} = \varepsilon + \frac{\mu_b}{E_a} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.17) ถ้าพิจารณาการคืบให้  $\frac{d\sigma}{dt} = 0$

$$\frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} = \varepsilon + \frac{\mu_b}{E_a} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.17)$$

จัดรูปใหม่

$$\frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \varepsilon = \frac{\mu_b}{E_a} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.18)$$

$$\frac{\frac{d\varepsilon}{dt}}{\frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \varepsilon} = \frac{E_a}{\mu_b} dt \quad (2.19)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.19)

$$\ln \left( \frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \varepsilon \right) - \ln \frac{\sigma}{E_b} = - \frac{E_a}{\mu} t \quad (2.20)$$

$$\frac{\left( \frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \varepsilon \right)}{\frac{\sigma}{E_b}} = \exp \left( - \frac{E_a}{\mu} t \right) \quad (2.21)$$

$$\left( \frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \varepsilon \right) = \frac{\sigma}{E_b} \exp \left( - \frac{E_a}{\mu} t \right) \quad (2.22)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} - \frac{\sigma}{E_b} \exp\left(-\frac{E_a}{\mu} t\right) \quad (2.23)$$

$$\text{ดังนั้น } \varepsilon(t) = \left[ \left( 1 - \exp\left(-\frac{E_a t}{\mu}\right) \right) \frac{\sigma}{E_b} \right] + \frac{\sigma}{E_a} \quad (2.24)$$

การเทียบเท่ากันของเวลา และอุณหภูมิ (Time-Temperature Equation)

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแข็งตัวของพลาสติก (Glass transition temperature,  $T_g$ ) พฤติกรรมการคืบของพลาสติกจะเป็นไปตามหลักการเทียบเท่ากันของเวลา และอุณหภูมิ ซึ่งกล่าวได้ว่า สำหรับวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก ข้อมูลการคืบที่อุณหภูมิหนึ่งสามารถนำไปซ้อนทับ (Superimposed) กับข้อมูลการคืบที่อุณหภูมิอื่นๆได้ โดยการเปลี่ยนสเกลของเวลาเพียงอย่างเดียว [Willam., 1975] ซึ่งหลักการนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีปริมาตรอิสระ (Free volume Theory) [Aklonis- Malknight., 1983] สำหรับวัสดุอสัณฐาน (Amorphous material) ทฤษฎีการกีดขวาง (Barrier Theory) สำหรับวัสดุที่มีความเป็นผลึก (Crystalline material) [Ward., 1983]

สำหรับวัสดุที่มีความเป็นผลึก เช่น เอชดีพีอี หลักการนี้สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.25) โดยอุณหภูมิอ้างอิงสามารถเลือกจากอุณหภูมิใดๆ ในช่วงการทดลอง

$$\log a_T = \log \frac{t}{t_{ref}} = \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (2.25)$$

เมื่อ  $a_T$  = ตัวเลื่อนค่า

$t, t_{ref}$  = เวลาใดๆ และเวลาอ้างอิง

$\Delta H$  = Activation Energy (KJ/mol)

$R$  = Gas Constant (ค่าคงที่ของก๊าซ = 8.314 KJ/Kg K)

$T, T_{ref}$  = อุณหภูมิใดๆ และอุณหภูมิอ้างอิง

จากหลักการนี้จะเห็นว่าเราสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการคืบ และเวลาที่อุณหภูมิใดๆได้ โดยการทำการทดลองที่เวลาสั้นๆ ที่หลายๆอุณหภูมิ

## 2.3 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสารทำความเย็น

วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีในปัจจุบันมีความไวมาก (High sensitivity) แม้กระทั่งสารตัวอย่างปริมาณหนึ่งในล้านของ 1 ไมโครกรัม หรือที่เรียกว่า 1 พิโคกรัม (pg) ก็ยังสามารถที่จะตรวจจับและหาเอกลักษณ์ของสารนั้นได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งทุกเทคนิคจะอาศัยหลักการพื้นฐานทางเคมี และฟิสิกส์ในการวิเคราะห์ ซึ่งเทคนิคแต่ละอย่างก็มีข้อดี ข้อเสียต่างกันดังแสดงในตาราง 2.2 เช่น IR และ NMR มีความสามารถในการวิเคราะห์เชิงปริมาณดี แต่จำนวนสารประกอบที่หาได้จากสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์บอกได้เพียง 1 ชนิดเท่านั้น ส่วน GC และ HPLC มีความสามารถหาจำนวนชนิดของสารประกอบจากสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ได้ถึง 300 ชนิด แต่ความสามารถในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพไม่ดี ส่วน MS มีความสามารถในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และวิเคราะห์เชิงคุณภาพดี แต่จำนวนสารประกอบที่หาได้จากสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์บอกได้เพียง 1-3 ชนิดเท่านั้น ซึ่งถ้ารวมเอาข้อดีของ GC และ MS มาเป็นเทคนิค GC-MS แล้วจะทำให้ขีดความสามารถในการวิเคราะห์เพิ่มมากขึ้น

ตาราง 2.1 เทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยอุปกรณ์สำหรับสารประกอบอินทรีย์

| เทคนิคการวิเคราะห์                                                              | ลักษณะข้อมูลที่ได้                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy : IR)                              | ไอร่าสเปกตรัม (IR spectrum)                              |
| นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance : NMR)                  | เอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัม (NMR spectrum)                      |
| แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography : GC)                                      | โครมาโทแกรม (Chromatogram)                               |
| ลิควิดโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography : HPLC)    | โครมาโทแกรม (Chromatogram)                               |
| แมสสเปกโตรเมตรี (Mass Spectrometry : MS)                                        | แมสสเปกตรัม (Mass spectrum)                              |
| แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry : GC-MS) | โครมาโทแกรม / แมสสเปกตรัม (Chromatogram / Mass spectrum) |

ที่มา : มงคล ราชะนาคร.; 2537

ตาราง 2.2 คุณสมบัติเฉพาะของเทคนิคการวิเคราะห์

| เทคนิคการวิเคราะห์ | จำนวนชนิดของส่วนประกอบในสารตัวอย่าง | คุณภาพวิเคราะห์ | ปริมาณวิเคราะห์ | ความไว (กรัม)       |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| IR                 | 1                                   | ปานกลาง         | ดี              | $10^{-3} - 10^{-6}$ |
| NMR                | 1                                   | ดี              | ดี              | $10^{-3}$           |
| GC                 | 1-300                               | ไม่ดี           | ดี              | $10^{-12}$          |
| HPLC               | 1-300                               | ไม่ดี           | ดี              | $10^{-9}$           |
| MS                 | 1-3                                 | ดี              | ดี              | $10^{-12}$          |
| GC-MS              | 1-300                               | ดี              | ดี              | $10^{-12}$          |

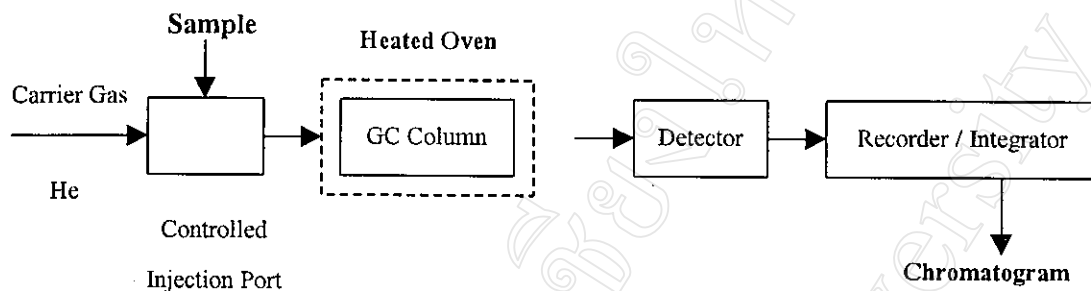
ที่มา : มงคล ราชะนาคร.; 2537

## 2.3.1 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสารทำความเย็นโดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี

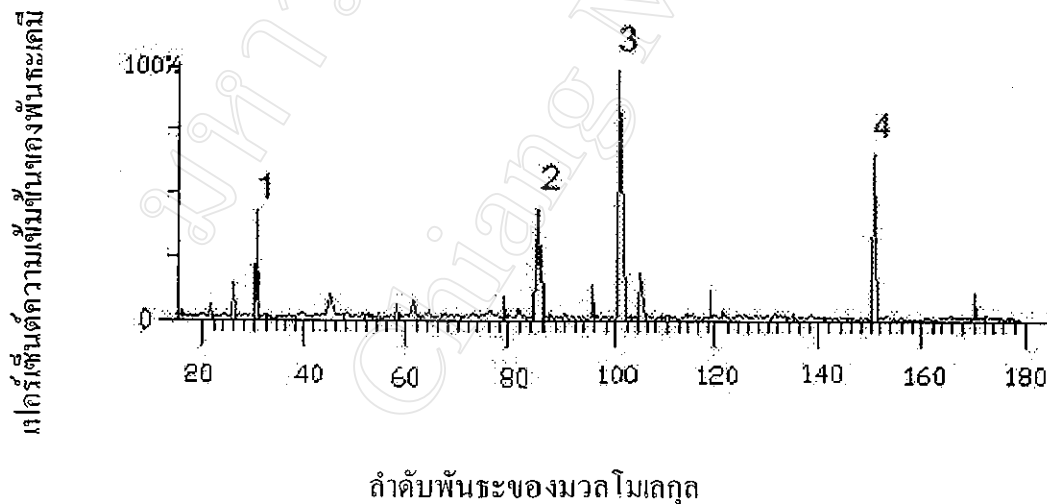
(Gas Chromatography: GC)

เครื่อง GC (Gas Chromatography) เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการแยกสารทางโครมาโทกราฟี ที่เกี่ยวข้องกับการแจกแจง (Distribution) หรือพาร์ทิชัน (Partition) ของสารประกอบใด ๆ ที่สถานะต่างกัน 2 สถานะคือ สถานะที่เคลื่อนที่ (Mobile phase) และสถานะที่อยู่นิ่ง (Stationary phase) ในของผสมที่มีสารประกอบหลายอย่าง เมื่อสารประกอบในของผสมเคลื่อนที่ผ่านสารประกอบที่มีสถานะที่อยู่นิ่ง โดยมีก๊าซเคลื่อนที่พาไป สารประกอบในของผสมอยู่ในสถานะที่อยู่นิ่งจะเกิดการเหนี่ยวรั้งมากน้อยต่างกันไป เนื่องจากความสามารถในการละลายก๊าซพาที่แตกต่างกัน และจะถูกแยกออกจากกัน สารใดที่มีความสามารถในการละลายในสถานะที่อยู่นิ่งมากกว่าก็จะใช้เวลานานกว่า ในการเคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ที่มีสถานะที่อยู่นิ่งบรรจุอยู่ หลักการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะแสดงอย่างคร่าวๆในรูป 2.8 การทำงานโดยปกติจะใช้แก๊สฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือ ไนโตรเจน ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่อัดอยู่ในถังเป็นแก๊สพา ส่วนสารประกอบสถานะคงที่เป็นของเหลวที่มีมวลโมเลกุลสูง โดยจะควบคุมอัตราการไหลของแก๊สพาโดยมาตรปรับแรงดัน (Pressure regulators) และมีเตอรืงวาล์ว (Metering valve) สารตัวอย่างจะถูกนำเข้าสู่แก๊สพาที่อุณหภูมิสูงที่พอจะทำให้ห้องค้ประกอบของสารตัวอย่างทั้งหมดกลายเป็นไอ เครื่องตรวจจับ (Detector) เป็นส่วนที่อยู่ต่อจากทางออกของคอลัมน์ ทำหน้าที่ตรวจวัดองค์ประกอบต่างๆของสารตัวอย่าง ในขณะที่สารตัวอย่างเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ ตัวตรวจจับจะสามารถตรวจวัดองค์ประกอบที่มาถึงแก๊สพาได้ แต่ไม่วิเคราะห์แก๊สพา ในขณะที่เครื่องบันทึกจะทำการบันทึก การตอบสนองของเครื่องตรวจจับเทียบกับเวลาทำให้

ได้สิ่งที่เรียกว่า โครมาโทแกรม (Chromatogram) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 2.9 โดยที่โครมาโทแกรมประกอบด้วยข้อมูลองค์ประกอบ (Composition) ต่างๆของสารผสมตัวอย่างที่มีความสำคัญเชิงเคมีวิเคราะห์ และแสดงปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดออกมาเป็นร้อยละของปริมาตรของผสมที่ฉีดเข้าไปตรวจสอบ แต่เครื่องมือไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นสารประกอบชนิดใด



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงอุปกรณ์แก๊สโครมาโทกราฟี  
ที่มา : มงคล ราชะนาคร (2537)

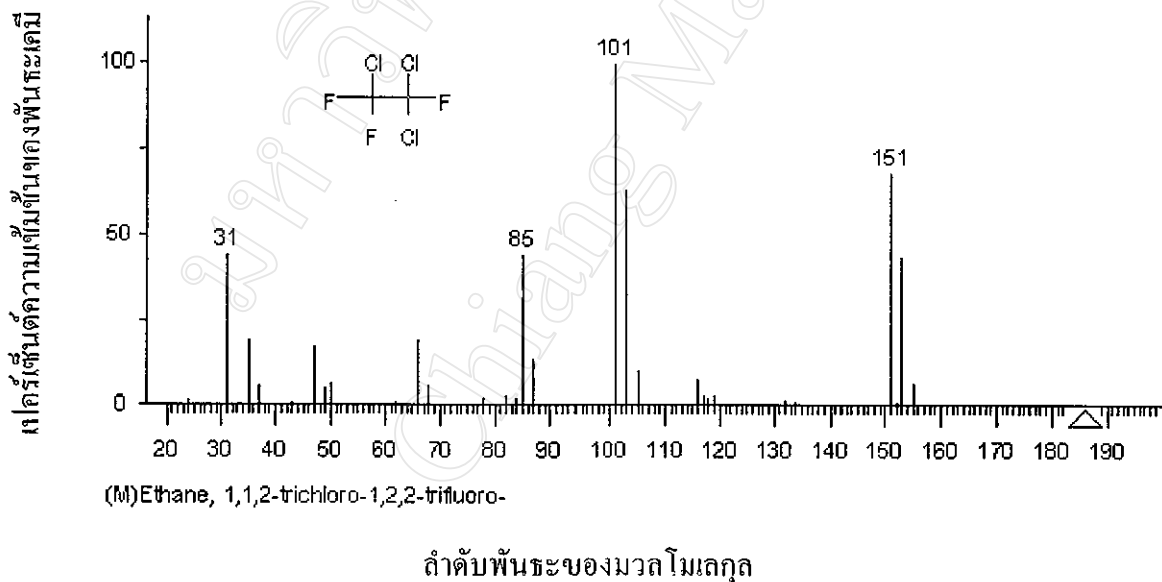


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของโครมาโทแกรม (Chromatogram) ของสารทำเย็น R113 มาตรฐาน

### 2.3.2 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสารทำความเย็นโดยใช้แมสสเปกโตรเมตรี

(Mass Spectrometry)

เมื่อโมเลกุลถูกไอออไนซ์ (Ionized) ในสุญญากาศ กลุ่มที่มีลักษณะเฉพาะของไอออนของมวลก็เกิดขึ้น เมื่อแยกไอออนเหล่านี้พล็อตค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของพันธะเคมี เทียบกับลำดับพันธะของมวลโมเลกุล ก็จะได้สิ่งที่เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.10 สเปกตรัมนี้สามารถใช้ในการบ่งบอกชนิดของพันธะโมเลกุลได้ การแปลความหมายของแมสสเปกตรัมใดๆ สามารถทำได้โดยติดตามกลไกและกฎของการแตกหัก (Fragmentation mechanisms and rules) คือการแตกตัวของสารที่นำมาทดสอบที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นอาจจะมีพันธะโมเลกุลอยู่หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออน และไหลไปพร้อมกับสารพาไม่เท่ากัน ในบางกรณีการแปลความหมายจะให้ผลการหาชนิดของสารประกอบของโมเลกุลได้แน่นอน แต่ในบางกรณีการใช้แมสสเปกโตรเมตรีก็อาจเป็นคำตอบส่วนหนึ่ง และคงต้องใช้วิธีการอื่นๆควบคู่ไปด้วย วิธีการอื่นๆที่มักใช้กันรวมไปถึงพฤติกรรมรีเทนชันใน GC, อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR) และเอ็นเอ็มอาร์ (NMR) สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) ของสารทำความเย็น R113 มาตรฐาน

### 2.3.3 การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของสารทำความเย็นโดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปก

#### โทรมetrie (Gas Chromatography- Mass Spectrometry)

สารตัวอย่างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารผสม การวิเคราะห์โดยใช้วิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) จะมีความสามารถบอกข้อมูลองค์ประกอบต่างๆของสารผสมตัวอย่างที่มีความสำคัญเชิงเคมีวิเคราะห์ และแสดงปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดออกมาเป็นร้อยละของปริมาตรของผสมที่ฉีดเข้าไปตรวจสอบ แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นสารประกอบชนิดใดได้ แต่เมื่อเมื่อรวมเอาแก๊สโครมาโทกราฟีเข้ากับแมสสเปกโทรมetrie (Mass spectrometry) ก็ได้เทคนิคใหม่เกิดขึ้นมาอีกเทคนิคหนึ่งเรียกว่าแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรมetrie (Gas Chromatography- Mass Spectrometry) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า GC-MS สามารถแยกและบอกชนิดของสารประกอบถึง 200-300 ชนิด จากการฉีดสารตัวอย่างเพียงครั้งเดียวได้ แม้ว่าสารเหล่านั้นมีอยู่ในตัวอย่างเพียง  $10^{-12}$  กรัมก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ ในตาราง 2.2 แล้วจะเห็นว่าเทคนิครวม GC-MS มีคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างของผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบจำนวนมาก ซึ่งรวมไปถึงสารทำความเย็นที่ใช้ทดสอบด้วย