หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

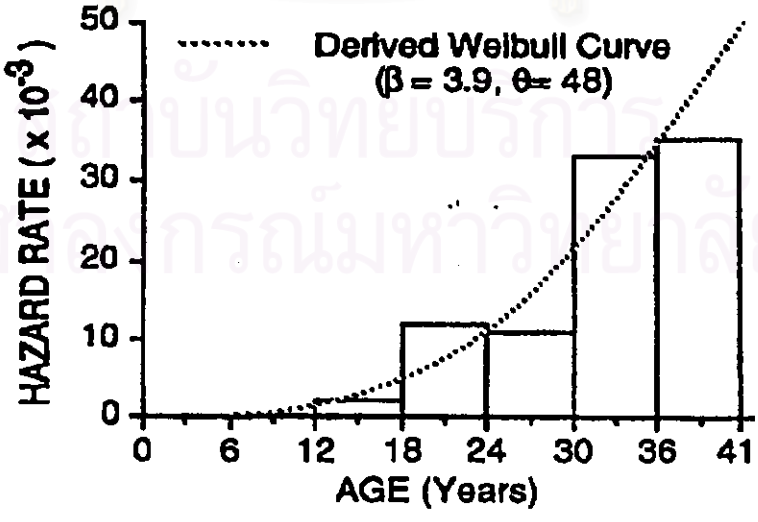
อายุการใช้งานของหม้อแปลง

2.1 อายุการใช้งานของหม้อแปลง

ในการศึกษาเรื่องอายุการใช้งานของหม้อแปลง ได้มีผู้แยกทำการศึกษาได้เป็น 2 แนวทาง ดังนี้

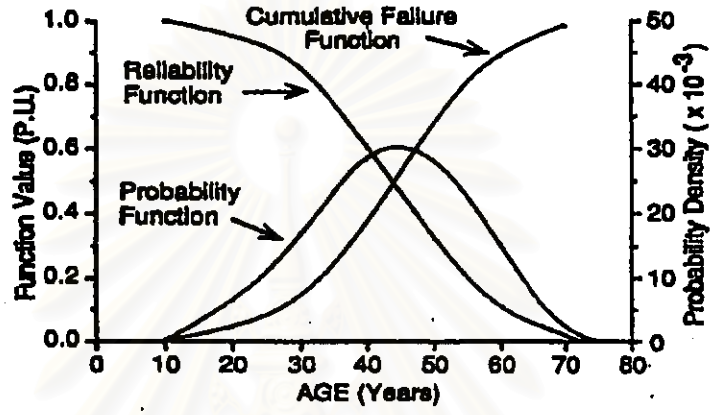
2.1.1 ศึกษาโดยการเก็บสถิติ

การศึกษาหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยการเก็บข้อมูลสถิตินี้ เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลของปัจจัย ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลง เพื่อประมาณอายุการใช้งานของหม้อแปลง ซึ่งวิธีนี้เป็นการศึกษาโดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากสถิติเก่า ๆ ที่มีผู้บันทึกไว้ ตัวอย่างการศึกษาด้วยวิธีนี้ เช่น สถิติการใช้งานของหม้อแปลงขนาดใหญ่ ของ Queensland Electricity Commission [1] ซึ่งถูกบันทึกข้อมูลทางสถิติไว้ตลอดระยะเวลา 25 ปี จำนวน 200 ลูก และเมื่อมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้งให้เท่ากัน พบว่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่หม้อแปลงจะเสียหายมีการกระจายแบบ Weibull โดยที่มีค่า $\beta = 3.9$ และ $\theta = 48$ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ค่าของ Hazard Function ของหม้อแปลงชนิดหนึ่ง

เมื่อนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่หม้อแปลงจะเสียหาย และฟังก์ชันความน่าเชื่อถือของหม้อแปลง จะได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งวิธีการศึกษาอายุการใช้งานของหม้อแปลงในแนวทางนี้ ข้อมูลที่ได้จะเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องอื่นๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป ซึ่งเป็นเรื่องที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงไม่ขอกล่าวในรายละเอียด



รูปที่ 2.2 ค่าของ Failure Probability & Reliability Functions

2.1.2 ศึกษาด้วยการวัดการเสื่อมสภาพของฉนวน

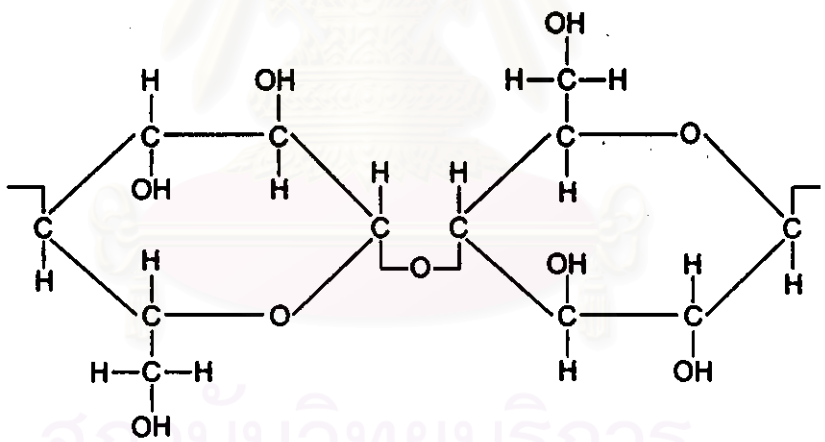
การเสื่อมสภาพของฉนวนสามารถวัดออกมาเป็นค่าได้ ด้วยวิธีการตามที่กำหนด เราจึงสามารถบอกได้ว่าขณะที่สภาวะใด ๆ สภาพฉนวนขณะนั้นเสื่อมสภาพลงไปเท่าใด แต่อย่างไรก็ตาม อายุการใช้งานที่แท้จริง ของหม้อแปลง อาจจะมีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่า อายุของฉนวน เพราะความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น จากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ ดังนั้น ถึงแม้เราจะทราบสภาพของฉนวน แต่อายุการใช้งานของหม้อแปลงก็อาจจะเปลี่ยนแปลงไปได้ แต่อย่างไรก็ตามเราก็ถือว่าอายุการใช้งานของฉนวนเป็นอายุการใช้งานของหม้อแปลง ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ในการศึกษาเรื่องอายุการใช้งานของหม้อแปลง

2.2 ฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลง

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ไม่มีส่วนประกอบตัวใดเคลื่อนที่ขณะทำงาน ยกเว้นอุปกรณ์เปลี่ยนแท็ปในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลด และอุปกรณ์ช่วยในการระบายความร้อน

เช่น ปั๊ม หรือ พัดลม ดังนั้นส่วนประกอบที่จะสึกหรอไปเนื่องจากการเสียดสี จึงไม่มีเหมือนกับอุปกรณ์อย่างมอเตอร์ แต่อุปกรณ์ที่เป็นฉนวนของหม้อแปลง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระดาษที่มีพวกเยื่อไม้เป็นส่วนประกอบหลัก และในสภาวะปกติจะพบว่า อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะขึ้นกับอายุการใช้งานของฉนวน ซึ่งสมมติฐานนี้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในการคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง

ในหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน และหม้อแปลงแบบแห้งจะมีกระดาษ หรือ กระดาษอัดทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก ฉนวนเหล่านี้จะมีส่วนประกอบหลักเป็นพวกเยื่อไม้ตามธรรมชาติมีโมเลกุลประกอบด้วยเซลลูโลสที่มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยมีสูตรโครงสร้างดังในรูปที่ 2.3 ค่า n ที่ห้อยอยู่จะบอกค่า Degree of Polymerization (DP) ซึ่งค่านี้จะเปลี่ยนไปตามชนิดของส่วนประกอบเยื่อไม้ที่มีอยู่ โดยทั่วไป n จะมีค่า 2500 หรือมากกว่าสำหรับพวกเส้นใยและจะมีค่า 1200 หรือมากกว่าสำหรับพวกเปลือกไม้ สำหรับหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมันจะมีน้ำมันหม้อแปลงเป็นส่วนประกอบด้วย โดยจะทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนและและตัวกลางในการระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส

2.2.1 คุณสมบัติของฉนวนประเภทกระดาษ

ทั้งหม้อแปลงแบบน้ำมันและหม้อแปลงแบบแห้ง จะใช้ฉนวนประเภทกระดาษเป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาถึงผลของความร้อนที่มีต่ออัตราการเสื่อมสภาพของฉนวนประเภทกระดาษ ซึ่งโดยทั่วไปคุณสมบัติของฉนวนประเภทกระดาษสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท คือ

ก) **คุณสมบัติทางกายภาพ** หมายถึงคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกลักษณะต่าง ๆ เช่น ชนิดของฉนวน , ความหนาแน่น , ความชื้น , ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมัน , ค่า permeability เป็นต้น

ข) **คุณสมบัติทางกล** หมายถึงความคงทนของฉนวนที่จะทนต่อ แรงดึง , แรงอัด , แรงเฉือน และความคงทนต่อความร้อน เป็นต้น

ค) **คุณสมบัติทางไฟฟ้า** หมายถึงความคงทนต่อค่าแรงดัน หรือกระแสในสภาวะปกติ และในสภาวะที่เกิดกระแสหรือแรงดันอิมพัลส์ เป็นต้น

ง) **คุณสมบัติทางเคมี** หมายถึงคุณสมบัติบางอย่าง เช่นความสามารถในการนำไฟฟ้า ของฉนวนในน้ำที่สภาวะค่า pH ต่างกัน และที่สิ่งเจือปนต่างๆ กันออกไป เป็นต้น

โดยทั่วไปการวัดค่าคุณสมบัติทางกลของฉนวนประเภทกระดาษ สามารถวัดได้หลายวิธี โดยค่าที่นิยมใช้คือค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง(tensile strength) ในปัจจุบันความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของฉนวน กับความร้อนที่เกิดจากความเครียดทางไฟฟ้า หรือความเครียดทางกล ยังไม่มีการหาความสัมพันธ์ที่แน่นอน จะมีก็แต่ความสัมพันธ์ทางความร้อน และการหาอายุการใช้งานของฉนวนในปัจจุบันที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป จะเป็นการคิดโดยคำนึงเฉพาะผลทางความร้อนเป็นหลัก

2.2.2 คุณสมบัติของฉนวนประเภทน้ำมัน

ฉนวนประเภทนี้จะใช้ในหม้อแปลงแบบน้ำมันเท่านั้น โดยจะทำหน้าที่หลักสองอย่างคือเป็นฉนวนระหว่างขดลวดแรงดันสูงและขดลวดแรงดันต่ำ และยังเป็นตัวกลางระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและขดลวด ออกไปสู่ตัวถังหรือตัวกลางระบายความร้อนแบบอื่นต่อไป โดยทั่วไปคุณสมบัติของฉนวนประเภทน้ำมันสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก) **คุณสมบัติทางกายภาพ** หมายถึงคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกลักษณะต่าง ๆ ของน้ำมัน เช่น ชนิดของน้ำมัน , ความหนาแน่น , ปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำมัน , จุดวาบไฟ , ความหนืด เป็นต้น

ข) คุณสมบัติทางไฟฟ้า หมายถึงความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ , ความต้านทานจำเพาะ , ตัวประกอบการกระจายไดอิเล็คตริก เป็นต้น

ค) คุณสมบัติทางเคมี หมายถึงคุณสมบัติบางอย่าง เช่นความเป็นกลางของฉนวน , เสถียรภาพในการออกซิเดชั่น , การตกตะกอนของสิ่งเจือปน , การกัดกร่อนที่เกิดจากซัลเฟอร์ เป็นต้น

เนื่องจากว่าน้ำมันในหม้อแปลงสามารถที่จะเปลี่ยนถ่าย ได้เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด ฉนวนน้ำมันนี้จึงไม่สามารถที่จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ ของอายุการใช้งานที่ลดลงตามเวลาได้เหมือนอย่างในกรณีของฉนวนประเภทกระดาษ แต่อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของหม้อแปลงก็ยังมีความเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันอยู่ เพราะฉนวนแบบกระดาษยังคงจุ่มอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงของหม้อแปลงแบบน้ำมัน โดยในขณะที่ฉนวนแบบกระดาษจุ่มอยู่ในน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง ความแข็งแรงทางกล และความแข็งแรงทางไดอิเล็คตริก (dielectric strength) จะมีค่าลดลงและอุณหภูมิที่สูงมากจนเกินไป จะทำให้กระดาษเปราะและองค์ประกอบภายในของฉนวนเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เลวลง ทำให้ค่าและความแข็งแรงทางไดอิเล็คตริกลดลงด้วย นอกจากนั้นฟองอากาศที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงขณะที่อุณหภูมิของน้ำมันสูงกว่า 140 °C หรือเกิดจากการที่ภายในหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างกระทันหัน ซึ่งจาก [2] ได้มีการทดลองจ่ายโหลดเกินพิกัดจาก 100% - 180% แล้วทำให้หม้อแปลงมีความดันลดลงอย่างกระทันหัน โดยการฉีดละอองน้ำคลุมตัวถังหม้อแปลง จะพบว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะปรากฏระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับขดลวดแรงดันสูง และจากนั้นได้มีการวัดค่าความคงทนของหม้อแปลงต่อแรงดันอิมพัลส์ พบว่ามีค่าลดลงจากปกติ 10% และจาก [3] ได้มีการทดลองคล้ายกัน แต่ระดับโหลดที่ใช้ประมาณ 260% พบว่าความคงทนของหม้อแปลงต่อแรงดันอิมพัลส์ เหลือเพียง 60% ของค่าปกติ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะทำให้ค่าและความแข็งแรงทางไดอิเล็คตริกลดลง

จากตัวอย่างนี้พบว่าน้ำมันหม้อแปลงยังเป็นปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่ง ที่ทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงได้ แต่ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นต่าง ๆ ในหม้อแปลงไม่สามารถที่จะคาดการณ์ล่วงหน้าได้เป็นระยะเวลานานๆ จึงไม่พบว่ามีผู้นำผลที่เกิดจากฉนวนประเภทน้ำมันหม้อแปลงมาร่วมประกอบ ในแบบจำลองของการประมาณอายุการใช้งานของหม้อแปลง

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวน

สภาพฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลงนั้น สามารถวัดได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว และการที่ฉนวนมีการเสื่อมสภาพลงนั้น ก็ขึ้นกับสภาพแวดล้อม ที่ฉนวนจะต้องเผชิญนั่นเอง ซึ่งสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนมี ดังนี้

2.3.1 **อุณหภูมิ** อุณหภูมินับเป็นปัจจัยหลัก ที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลงได้มากที่สุด เพราะขณะที่ฉนวนต้องอยู่ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ๆ ความร้อนจะไปทำลายความเป็นเส้นใยของฉนวน ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสเกิดการแตกแยกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงกว่าเดิม ซึ่งแน่นอนว่าค่า DP ต้องลดลง และผลที่ตามมาคือความแข็งแรงต่อแรงดึง จะมีค่าลดลงมาก

2.3.2 **ความชื้น** พันธะของออกซิเจน ระหว่างอะตอมของกลูโคส จะเกิดการแตกออกเป็น โมเลกุลของ OH ปรากฏอยู่ข้างละหนึ่งโมเลกุล ในโมเลกุลของกลูโคส ซึ่งมีผลทำให้ค่า DP ลดลง

2.3.3 **ออกซิเจน** เมื่อมีก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น ก๊าซออกซิเจนจะไปจับกับอะตอมของคาร์บอนเกิดเป็นสารประกอบพวกอัลดีไฮด์(aldehydes) และ กรด ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำ , คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของพันธะในโมเลกุลของกลูโคสอ่อนลง ซึ่งจะทำให้ค่า DP ลดลง และน้ำที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกริยาดังในหัวข้อ 2.3.2

2.4 อายุการใช้งานทางความร้อน

2.4.1 อุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด

ในการหาอายุการใช้งานทางความร้อนของหม้อแปลงนั้น จำเป็นที่จะต้องกล่าวถึงอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดเสียก่อน ซึ่งอุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด หมายถึง อุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงในขณะที่จ่ายโหลด ซึ่งในสภาพการใช้งานจริงจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดนี้ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของโหลด ที่หม้อแปลงต้องจ่ายให้อันเนื่องมาจากรูปแบบการกระจายของฟลักซ์แม่เหล็กที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งผลกระทบของการกระจาย

ของฟลักซ์แม่เหล็กที่แตกต่างกันนี้ จะมีผลมากในหม้อแปลงแบบฉนวนแห้ง แต่จะมีผลน้อยในหม้อแปลงแบบน้ำมัน ทั้งนี้เพราะในหม้อแปลงแบบจุ่มน้ำมัน จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณตอนบนของขดลวด อันเนื่องมาจากการพาความร้อนของน้ำมันที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง จะมีรูปแบบการพาความร้อนจากบริเวณขดลวดที่อยู่ตอนล่าง ขึ้นไปสะสมยังบริเวณขดลวดที่อยู่ตอนบน

ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงเนื่องจากผลทางความร้อนนี้ จะสมมติให้ จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดนี้มีตำแหน่งที่คงที่ตลอดเวลา โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะการจ่ายโหลด ซึ่งการนิยามแบบนี้ จะทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า จุดที่ฉนวนจะมีการเสื่อมสภาพลงได้มากที่สุด จะเกิดขึ้นที่จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดนี้เอง

2.4.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการหาอายุการใช้งานที่ลดลงไป

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในฉนวนประเภทกระดาษนั้นประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสารประเภทอินทรีย์ และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปสำหรับการศึกษาในเรื่องนี้ ว่าการเสื่อมสภาพของสารอินทรีย์ มีอัตราการเสื่อมสภาพเป็นรูปกราฟเอ็กโปเนนเชียล เป็นไปตามทฤษฎีของ Arrhenius ที่ว่าอัตราการเสื่อมสภาพทางความร้อนของสารอินทรีย์และอนินทรีย์จะเป็นผลสะสมของอุณหภูมิ และระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$\frac{dR}{dt} = Ae^{-E/KT} \qquad (2.1)$$

หรือ $$ln(t) = \left[\frac{E}{K}\right]\frac{1}{T} + B \qquad (2.2)$$

หรือ $$log(Life(t)) = A_{10} + B_{10}/T \qquad (2.3)$$

โดยที่

$\frac{dR}{dt}$	คืออัตราการเสื่อมสภาพของสาร
B	คือค่าคงที่
E	คือค่าพลังงานกระตุ้นของวัสดุ(Activation Energy)
K	คือค่าคงที่ของ Boltzmann (1.38×10^{-23})

t คือเวลาเป็นชั่วโมง

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วย องศาเคลวิน โดยมีค่าเท่ากับ $\theta_{hs} + 273$ โดย θ_{hs} เป็นอุณหภูมิ ณ. จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด

A_{10}, B_{10} คือค่าคงที่ในระบบฐานสิบ ขึ้นอยู่กับฉนวนแต่ละชนิด

สมการ (2.1),(2.2) และ (2.3) ล้วนเป็นสมการที่อธิบายทฤษฎีของ Arrhenius ทั้งสิ้นแต่อยู่ในรูปแบบที่ต่างกันออกไป จากสมการที่ (2.2) ถ้านำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $ln(t)$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ที่มีความชันกราฟเท่ากับ $\frac{E}{K}$ ซึ่งค่านี้ จะเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด และโดยทั่วไปค่า E ของฉนวนจะมีค่าตั้งแต่ 0.1 eV ไปจนกระทั่ง 1.15 eV โดยปริมาณสารที่มีค่าพลังงานนี้ต่ำกว่า 0.5 eV จะมีอยู่เพียง 3 % เท่านั้น

ความชันที่ได้จากสมการ (2.2) นั้นมีความสำคัญมากในการหาอายุการใช้งานที่ลดลงของฉนวนโดยสามารถแสดงได้ดังนี้ จากสมการที่ (2.2) เมื่อพิจารณาที่จุดสองจุด ระหว่างอุณหภูมิ T_2 และ T_1 จะได้ว่า

$$ln(t_1) - ln(t_2) = \left[\frac{E}{K}\right]\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right] \qquad (2.4)$$

สมมติให้ช่วงเวลาดังกล่าวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_2 ไปเป็น T_1 ซึ่งทำให้เราเขียนได้ว่า $T_1 = T_2 + \Delta T$ แล้วแทนลงในสมการที่ (2.4) จะได้ว่า

$$ln(t_1) - ln(t_2) = \left[\frac{E}{K}\right]\left[\frac{1}{T_2 + \Delta T} - \frac{1}{T_2}\right] \qquad (2.5)$$

สามารถเขียนเป็นสมการสุดท้ายได้ดังนี้

$$t_1 = t_2 e^{-\left(\frac{E}{K}\right)\frac{\Delta T}{T_2(T_2+\Delta T)}} \qquad (2.6)$$

เพื่อความเข้าใจยิ่งขึ้นจะขอยกตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบดังต่อไปนี้ [4]

ตัวอย่าง สมมติมีฉนวนอยู่ 3 ชนิด มีพิกัดของอุณหภูมิขณะใช้งานที่ 85 องศาเซลเซียส โดยมีอายุการใช้งาน 40 ปี ฉนวนชนิดแรกมีค่าพลังงานกระตุ้น E =0.74 eV ชนิดที่สองมีค่าพลังงานกระตุ้น E =0.51 eV และชนิดที่สามมีค่าพลังงานกระตุ้น E =1.1 eV เราจะสามารถเปรียบเทียบอัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงได้ดังนี้

วิธีการเปรียบเทียบ จากค่าพลังงานกระตุ้นของฉนวนทั้งสามชนิดเราสามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการของ Arrhenius ได้โดยการแทนค่าคงที่และตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ (2.6) โดยที่ 1eV มีค่าเท่ากับ 1.602 x 10^{-19} joule จะได้สมการดังนี้

$$t_1 = 40e^{-8.58x10^3 \frac{\Delta T}{358(358+\Delta T)}} \qquad (2.7)$$

$$t_1 = 40e^{-5.91x10^3 \frac{\Delta T}{358(358+\Delta T)}} \qquad (2.8)$$

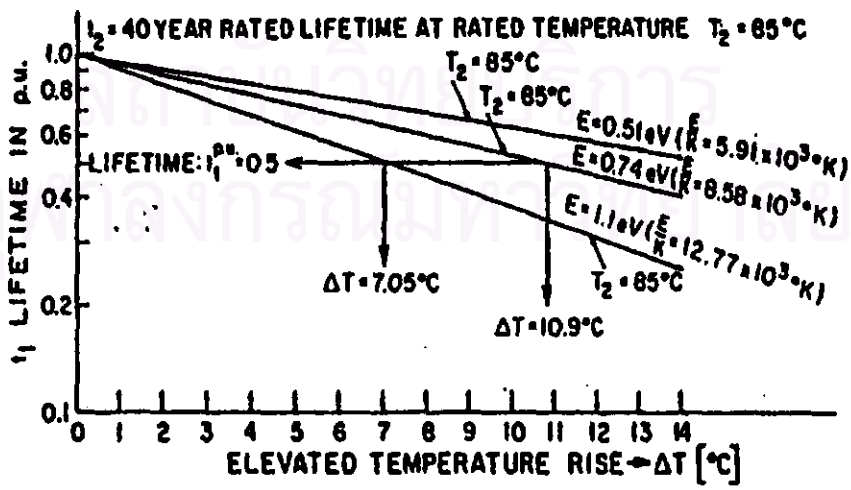
$$t_1 = 40e^{-12.77x10^3 \frac{\Delta T}{358(358+\Delta T)}} \qquad (2.9)$$

เมื่อนำมาสร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ΔT กับอัตราส่วนของอายุการใช้งานที่ลดลงจะได้ดังในตารางที่ 1

จากสมการที่ (2.7) , (2.8) และ (2.9) เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากอุณหภูมิการใช้งานปกติ กับค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของอายุการใช้งานสัมพัทธ์ จะได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.4 จากความสัมพันธ์ที่ได้พบว่าฉนวนที่มีค่าพลังงานกระตุ้นสูงจะมีอัตราการเสื่อมสภาพ สูงกว่าฉนวนที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่า จากตัวอย่างระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ΔT ที่ทำให้อายุการใช้งานเป็น 0.5 p.u. มีค่าเท่ากับ 7.05 ° C และ 10.9 ° C สำหรับฉนวนที่มีพลังงานกระตุ้น 1.1 eV และ 0.74 eV ตามลำดับ

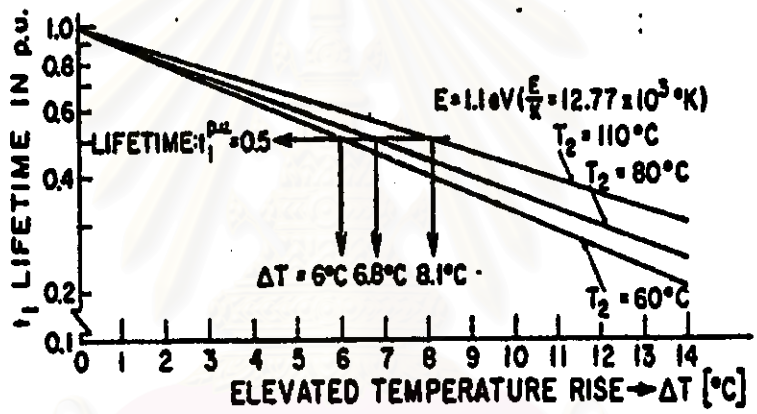
ตารางที่ 2.1 ค่าของอายุการใช้งานที่ลดลงของฉนวนทั้ง 3 ชนิดกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากระดับการใช้งานปกติของฉนวน

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT (°C)	ค่าพลังงานกระตุ้นของฉนวน (eV)					
	0.74		0.51		1.1	
	t_1 (year)	t_1/t_2 (p.u.)	t_1 (year)	t_1/t_2 (p.u.)	t_1 (year)	t_1/t_2 (p.u.)
0	40.0	1.0	40.0	1.0	40.0	1.0
1	37.4	0.94	38.2	0.96	36.2	0.91
2	35.0	0.88	36.5	0.91	32.8	0.82
3	32.8	0.82	34.9	0.87	29.7	0.74
4	30.7	0.77	33.3	0.83	27.0	0.67
5	28.8	0.72	31.9	0.80	24.5	0.61
6	27.0	0.67	30.5	0.76	22.2	0.56
7	25.3	0.63	29.2	0.73	20.2	0.50
8	23.7	0.59	27.9	0.70	18.3	0.46
9	22.2	0.56	26.7	0.67	16.7	0.42
10	20.9	0.52	25.5	0.64	15.2	0.38
20	11.3	0.28	16.7	0.42	6.1	0.15



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับค่า ΔT ที่ค่า E ต่าง ๆ กัน

จากสมการที่ (2.9) เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากอุณหภูมิ T_2 โดยที่อุณหภูมิ T_2 เริ่มต้นที่ 60 ° C , 80 ° C และ 110 ° C ตามลำดับ กับค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของอายุการใช้งานสัมพัทธ์ จะได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.5 จากความสัมพันธ์ที่ได้พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิเริ่มต้น T_2 แตกต่างกันมีผลทำให้ ค่าของระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ΔT ที่ทำให้อายุการใช้งานเป็น 0.5 p.u. มีค่าแตกต่างกันด้วย จากตัวอย่างระดับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ΔT ที่ทำให้อายุการใช้งานเป็น 0.5 p.u. มีค่าเท่ากับ 6 ° C , 6.8 ° C และ 8.1 ° C สำหรับอุณหภูมิ T_2 ที่เริ่มต้นที่ 60 ° C , 80 ° C และ 110 ° C ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับค่า ΔT ที่ค่า T_2 ต่าง ๆ กัน

จากสมการในรูปแบบต่างๆ ของ Arrhenius จะได้ว่า การที่เราจะสามารถคำนวณอายุการใช้งานของฉนวนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้นั้น เราจะต้องทราบว่าฉนวนนั้นมีอายุการใช้งานเป็นเท่าใด ที่อุณหภูมิอ้างอิงค่าหนึ่งก่อน

อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 80 °C - 140 °C มีผู้พบว่าทุกๆ ค่าอุณหภูมิ 6 °C ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งค่านี้น่าจะใกล้เคียงกับสภาพจริงที่เกิดขึ้นกับฉนวนประเภทที่มีส่วนประกอบของเยื่อไม้อยู่ ซึ่งความสัมพันธ์นี้ถูกเสนอขึ้นโดย Montsinger ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V = \frac{ageing\ rate\ at\ \theta_h}{ageing\ rate\ at\ 98^\circ C} = \left(\frac{1}{2}\right)^{(\theta_h - 98)/6} \qquad (2.10)$$

สมมติว่า เวลาในช่วงอายุเวลาการใช้งานของหม้อแปลงคิดเป็น 1 เปอร์ยูนิต และเราแบ่งช่วงเวลานี้ออกเป็น n ช่วง เท่า ๆ กัน เพราะฉะนั้น จะได้ว่า แต่ละช่วงเวลาที่เราแบ่งจะมีความกว้างเป็น 1/n เปอร์ยูนิต และสมมติให้อุณหภูมิตลอดช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลงนี้เป็น 98 °C ซึ่งจากตารางที่ 2.1 จะได้ว่าอายุการใช้งานของหม้อแปลงนี้จะเป็น 1 เปอร์ยูนิต ซึ่งหมายความว่า อายุการใช้งานที่ลดลงไปในแต่ละช่วงเวลาที่แปงมีค่าเท่ากับ 1/n

ความหมายก็คือในแต่ละช่วงเวลาที่หม้อแปลงมีการใช้งาน อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะลดลงตลอดเวลา โดยอายุการใช้งานที่ลดลงนี้ก็คือส่วนกลับของอายุการใช้งานที่คาดการณ์ไว้ในแต่ละช่วงนั้นเอง และในสภาพจริงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิมีลักษณะที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของอายุการใช้งานที่ลดลงในช่วงเวลาระหว่าง t_1 กับ t_2 ได้ดังสมการ

$$L = \int_{t_1}^{t_2} (1/V)dt \qquad (2.11)$$

โดยที่

L คืออายุการใช้งานที่ลดลงไป

V คืออายุการใช้งานที่คาดไว้

แต่สมการนี้ไม่มีประโยชน์ในทางปฏิบัติมากนักทั้งนี้เพราะ ฟังก์ชันอายุการใช้งานที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลาจะขึ้นกับค่าของอุณหภูมิ แต่ค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปโดยไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้น การคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลงในทางปฏิบัติ ทำได้โดยการแบ่งช่วงอายุการใช้งานออกเป็นช่วงๆ โดยที่ในแต่ละช่วงมีความกว้างเท่ากัน แล้วทำการรวมผลของอายุการใช้งานที่ลดลงในแต่ละช่วงเวลา ดังสมการ

$$L = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(1/V) \qquad (2.12)$$

โดย

V คืออายุการใช้งานสัมพัทธ์

θ_h คืออุณหภูมิของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด

2.4.3 การคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง

ไม่ว่าเราจะใช้สมการแบบดั้งเดิมของ Arrhenius หรือสมการในรูปแบบของ Montsinger ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลง ก็สามารถทำได้ทั้งสิ้น แต่เพื่อความสะดวก จะขอยกตัวอย่างการใช้สมการของ Montsinger ในการอธิบาย โดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปของอายุการใช้งานในหน่วยเปอร์ยูนิต

ตาม IEC 354 [5] สมการของ Montsinger เป็นไปตามสมการที่(2.10) ซึ่งหมายความว่า ทุกๆ อุณหภูมิ 6 °C ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 98 °C จะมีผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงครึ่งหนึ่ง จากอายุการใช้งานที่ 98 °C และทุกๆ อุณหภูมิ 6 °C ที่ลดลงจากอุณหภูมิ 98 °C จะมีผลทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของอายุการใช้งานที่ 98 °C ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 อายุการใช้งานสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ θ_h

θ_h	อายุการใช้งานสัมพัทธ์
74	16
80	8
86	4
92	2
98	1
104	0.5
110	0.25
116	0.125
122	0.0625

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

L คืออายุการใช้งานที่ลดลงไป

N คือจำนวนช่วง

V คืออายุการใช้งานที่คาดไว้

โดยทั่วไปการคิดอายุการใช้งานที่ลดลง จะคิดในช่วงเวลาที่แน่นอนค่าหนึ่ง เช่น วัน , เดือน หรือปีก็ได้ และเมื่อเราได้อายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลงในช่วงเวลานั้นแล้ว เราจะประมาณอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้จากส่วนกลับของอายุการใช้งานที่ลดลง เช่น อายุการใช้งานที่ลดลงของหม้อแปลงใน 1 วัน มีค่าเท่ากับ 0.0137 % p.u. จะได้ว่า

อายุการใช้งานของหม้อแปลง = 1/(0.0137 x 3.65)

= 20 ปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย