

การคำนวณอายุการใช้งานหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม เฉลี่ยรายปีและอุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์สองชั้น

Computation of Oil-Immersed Transformer Life Under the Yearly Average Ambient Temperature and Double Sinusoidal Ambient Temperature

สิริวิช ทัดสวน^{1*} และศุภเดช ตะเพียนทอง²

Siriwich Tadsuan^{1*} and Supardes Tapeantong²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

* ผู้นิพนธ์ประสานงานโทรศัพท์ 0-2807-4500-27 ต่อ 388 อีเมล : siriwicht@sau.ac.th

บทคัดย่อ งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเรื่องการยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน โดยการจำลองสภาพวัฏจักรภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงและคำนวณค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน จุดร้อนสุด อายุที่สูญเสีย และอายุการใช้งานของหม้อแปลง ซึ่งเปรียบเทียบกับรูปแบบสมการอุณหภูมิแวดล้อมซายน์ 2 ชั้น กับรูปแบบสมการอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปี ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบถึงความแตกต่างจาก 2 รูปแบบ ดังนั้นจะเป็นตัวอย่างที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงตามสภาพความเป็นจริงการป้องกันหม้อแปลงร้อนเกินและงานเศรษฐศาสตร์ของหม้อแปลงอีกด้วย

คำสำคัญ: หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน จุดร้อนสุด อุณหภูมิแวดล้อม อายุที่สูญเสีย อายุการใช้งาน

Abstract This paper presents the extension of oil-immersed transformer lifetime. The simulation of load cycles and calculation of top oil temperature, hottest-spot, loss of life and lifetime of transformer are studied by comparing the equations of double sinusoidal ambient temperature model with equations of yearly average ambient temperature model. The results reveal the significant differences of two models which will become a good example for a modified use of transformer in the field work including a protection of overheating transformer and economic concerns.

Keywords: Oil-Immersed Transformer, Hottest-Spot, Ambient Temperature, Loss of Life, Lifetime

1. บทนำ

ความร้อนที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดสมรรถนะการใช้งานของตัวหม้อแปลงเอง ถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระได้มากกว่าปกติ ในทางกลับกัน ถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงก็จะทำให้ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระต่ำกว่าปกติ ($P_{Loss} = i^2R$ โดยที่ R ของตัวนำ \propto อุณหภูมิ) ดังนั้น ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขนาดการจ่ายกระแสของหม้อแปลงก็คืออุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง[1-4] เช่น อุณหภูมิที่จุดร้อนสุดของลวดตัวนำ อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของลวดตัวนำ อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนและรวมถึงอุณหภูมิแวดล้อมรอบๆ ตัวหม้อแปลงเอง เมื่อหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงกว่าขีดจำกัดสิ่งที่ตามมาก็คือจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิและอายุการใช้งานของหม้อแปลง โดยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว ที่ทำงานในลักษณะแยกกันจ่ายภาระไฟฟ้าและกรณีที่ต้องหม้อแปลงขนานกันแล้วร่วมกันจ่ายภาระไฟฟ้า รวมถึงกรณีมีการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลง จากช่วงเวลากลางวันเปลี่ยนเป็นช่วงเวลากลางคืน โดยการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงนั้น ได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมจากสถานีอุตุนิยมวิทยากรุงเทพฯ จ. กรุงเทพมหานคร (รหัสสถานี455201) มาร่วมพิจารณาด้วย

2. วิธีการวิจัย

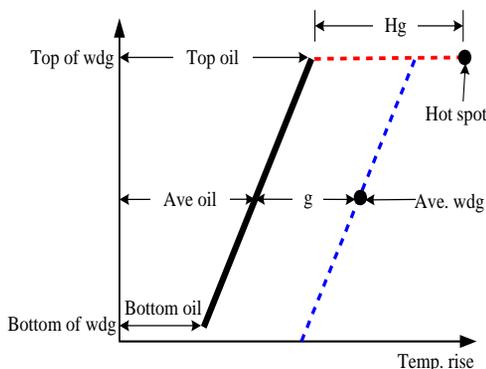
2.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในหม้อแปลง

จาก [4] ได้มีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับความร้อนหม้อแปลงดังรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิน้ำมันภายในหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบนจะเพิ่มเป็นเชิงเส้น

2. อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำทุกๆ ตำแหน่งของขดลวดจะมีค่าเพิ่มเป็นเชิงเส้นและขนานกับเส้นอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน โดยมีค่าความแตกต่างคงที่ (g) ระหว่างเส้นทั้งสอง

3. อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดจะสูงกว่าอุณหภูมิเพิ่มของตัวนำที่ด้านบน เนื่องจากค่าสูญเสียปลิกย่อย (Stray Loss) ที่เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างจุดที่ร้อนสุดของขดลวดด้านบนกับน้ำมันด้านบน ได้จากค่า H คูณกับ g โดยที่ H เป็นตัวประกอบมีค่าจาก 1.1 ถึง 1.5 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลง ซึ่งกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายมีค่าเท่ากับ 1.1 และหม้อแปลงกำลังขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 1.3



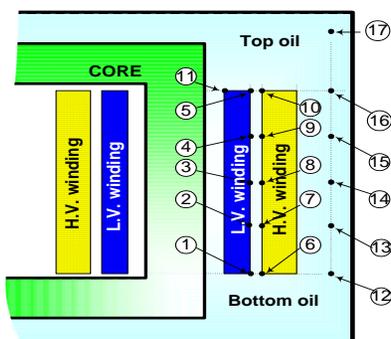
รูปที่ 1 แผนผังความร้อน

2.2 การทดสอบและทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง เพื่อหาค่า % อายุสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

จาก [5] ได้ทำการทดสอบเพื่อสืบสวนความร้อนในหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่มีการระบายความร้อนแบบที่มีการระบายความร้อนโดยอาศัยการหมุนเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติ (OA) แบบที่มีการติดตั้งพัดลมเพิ่มขึ้น (FA) และแบบที่มีการทำให้น้ำมันหมุนเวียนเร็วขึ้น โดยการติดตั้งปั๊มเพิ่มขึ้นอีก (FOA) โดยการทดสอบได้ใช้ตัวเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งตามตำแหน่งขดลวดในถังหม้อแปลงที่ด้านล่างและด้านบน โดยได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการ

ทดสอบกับการคำนวณของ IEEE [2] มีความแตกต่างกัน จาก [6] เป็นการทดสอบตามสมมติฐานของ [4] เพื่อหา ค่า อุณหภูมิหมีแปลงแบบแช่น้ำมัน ขนาด 10 kVA, 380 V/220 V, D/y 11 โดยมีการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ในถังหม้อแปลง แสดง ดังรูปที่ 2 ซึ่งผลจากงานวิจัยสามารถสรุปได้คือ

1. อุณหภูมิขดลวดที่ด้านบนมีค่ามากกว่าที่ระดับล่างและ อุณหภูมิมีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรงตลอด ความสูง
2. อุณหภูมิน้ำมันด้านบนมีค่ามากกว่าที่ระดับล่างและ อุณหภูมิมีลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้นโค้งต่างจาก [4] ที่ กล่าวไว้ว่าจะเป็นแนวเส้นตรง
3. อุณหภูมิขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ ที่ขดลวดแรงดันไฟฟ้าสูง
4. อุณหภูมิขดลวดมีค่ามากกว่าอุณหภูมิน้ำมัน เมื่อ พิจารณาที่ระยะความสูงเดียวกัน



รูปที่ 2 การวัดอุณหภูมิขดลวดและอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในถังหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

จาก [7] เป็นการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์ อย่างง่าย สำหรับการคำนวณจุดร้อนสุดของหม้อแปลง ขนาด 250 MVA, 400 MVA ระบายความร้อนแบบ ONAF และ 605 MVA ระบายความร้อนแบบ OFAF โดยผลการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระหลายๆ ช่วง (ตั้งแต่ไม่มีภาระจนถึงมากกว่าพิกัด) ค่าที่ได้จาก

การคำนวณของโมเดลอย่างง่ายและโมเดล ของ IEEE [3] เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการ ทดสอบผลลัพธ์ที่ได้ ค่าผิดพลาดของโมเดลอย่างง่ายมี ค่าน้อยกว่าโมเดลของ IEEE [3] เล็กน้อย ส่วนเวลาที่ใช้ ทดสอบเพียง 750 นาที ส่วน [8] เป็นการทำนาย อุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาดใหญ่ เพื่อที่จะ พัฒนาโมเดลสู่การทำงานในระบบออนไลน์ในอนาคต จาก [9] ได้วิจัยในเรื่องของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกับจุดร้อน สุดของหม้อแปลง ซึ่งมีตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพิ่มเติม จาก IEEE [1-3] คือความเร็วลมและผลกระทบของรังสี ความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลจริงที่รวบรวมมา จากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 MVA โดยใช้ทุลบล็อก ซิมมูลิ่งค์ของ โปรแกรมเมทแลปมาจำลองหาอุณหภูมิ น้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดของหม้อแปลง

จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาเห็นได้ว่าเป็นการ ทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ โดย แท้จริงแล้วอุณหภูมิแวดล้อมจะแตกต่างกันตามช่วง ฤดูกาลและช่วงเวลากลางวัน-กลางคืน [10-12] และจาก [4] ได้กล่าวไว้ว่ากรณีที่อุณหภูมิที่ตัวหม้อแปลงขณะใช้ งานสูงกว่าอุณหภูมิขีดจำกัดของหม้อแปลงที่ทุกๆ 6°C จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงครึ่งหนึ่ง โดยที่อายุใช้งานของหม้อแปลงตามปกติมีอายุ 20 ปี [1-3] และจาก [13] ได้ทำการออกแบบและพัฒนาสร้าง เครื่องเฝ้าติดตามอุณหภูมิและภาระของหม้อแปลง จำหน่ายแบบแช่น้ำมันชนิด 1 เฟส โดยได้ออกแบบให้ม การแสดงผลค่าอุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงด้านบนและจุด ร้อนสุดด้วย จากการเก็บข้อมูลบริเวณหน้างานจริงค่า อุณหภูมิแวดล้อมมีค่ามากที่สุด 40°C ที่เวลาประมาณ 14.00 น. แต่อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยมีค่า 30°C ซึ่งเห็น ได้ว่าค่าอุณหภูมิทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้น ถ้านำค่าอุณหภูมิแวดล้อมแต่ละท้องถิ่นที่ติดตั้งหม้อ แปลงมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นก็จะช่วยให้การทำนาย อุณหภูมิหม้อแปลงถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จาก [1-3] อายุของฉนวนหรือความเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้นกับฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา ในการพิจารณาที่ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ของฉนวนจะมีลักษณะแตกต่างกันที่บริเวณจุดร้อนสุดจะได้รับความเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่นๆ เพราะฉะนั้นในการศึกษาอายุของฉนวนมักเป็นการพิจารณาผลกระทบของอายุที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาอุณหภูมิที่จุดร้อนสุด ในการแนะนำสมมติฐานของค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนตามทฤษฎีสมการของ Arrhenius ได้กล่าวไว้ว่า ที่อายุของฉนวนจะมีฟังก์ชันเหมือนกับลอการิทึม ดังสมการที่ 1

$$\text{Log}_{10} \text{life (hour of life)} = A + \frac{B}{T} \quad (1)$$

เมื่อ

A, B คือค่าคงที่ ดังตารางที่ 1 และ $T = \Theta_h + 273$

ดังนั้น จะได้อายุการใช้งาน หน่วยชั่วโมง ดังสมการที่ 2 และความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 5

$$\text{hour of life} = 10^{\left(\frac{A+B}{T}\right)} \quad (2)$$

ส่วนกลับของอายุการใช้งานคืออายุที่สูญเสียแสดงดังสมการที่ 3 และพารามิเตอร์ A, B มีค่าดังตารางที่ 1

$$\text{Loss of Life} = 10^{-\left(\frac{A+B}{T}\right)} \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 เมื่อพิจารณาในช่วงระยะเวลา t จะได้ดังสมการที่ 4

$$\text{Loss of Life} = t \times 10^{-\left(\frac{A+B}{T}\right)} \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 ใช้ได้เฉพาะที่ค่า T ของเวลา t เพียงค่าเดียว แต่ในสภาพความเป็นจริงระดับของค่า T

จะมีหลายค่าในช่วงเวลาทั้งหมดที่พิจารณา ดังนั้นสามารถหาค่าอายุที่สูญเสียรวมดังสมการที่ 5

$$\text{Total Loss of Life} = \sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(\frac{A+B}{T_t}\right)} \quad (5)$$

สามารถคำนวณหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้จากส่วนกลับของอายุที่สูญเสียรวมดังสมการที่ 6

$$\text{Life} = \frac{1}{\text{Total Loss of Life}} = \frac{1}{\left(\sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(\frac{A+B}{T_t}\right)}\right)} \quad (6)$$

ส่วนสมการของอุณหภูมิหม้อแปลงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงดังสมการที่ 7 ถึงสมการที่ 10 และขีดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในสภาวะที่ภาระมากกว่าปกติหม้อแปลงแสดงดังตารางที่ 2

ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^n \quad (7)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^n + \Theta_{gr} \cdot K^{2n} \quad (8)$$

ที่สภาวะชั่วคราว

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (9)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \left[\Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + \Theta_{gr} \cdot K^{2n} \quad (10)$$

โดยที่

τ คือ เวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง
R คือ อัตราส่วนกำลังสูญเสียภาระที่พิกัด ต่อกำลังสูญเสียที่ไรภาระ

Θ_{or} คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ที่มากกว่าอุณหภูมิ
แวดล้อม ที่พิกัดภาระ, °C

Θ_{gr} คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่า
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน ที่พิกัดภาระ, °C

Θ_{oi} คือ อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนช่วง
ระหว่างเวลาเริ่มต้น, °C

Θ_{ou} คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของน้ำมันด้านบนที่ทุกๆ
ภาระ, °C

Θ_{ot} คือ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่ภาระใดๆ
ในสภาวะชั่วคราว, °C

Θ_h คือ อุณหภูมิจุดร้อนสุด, °C

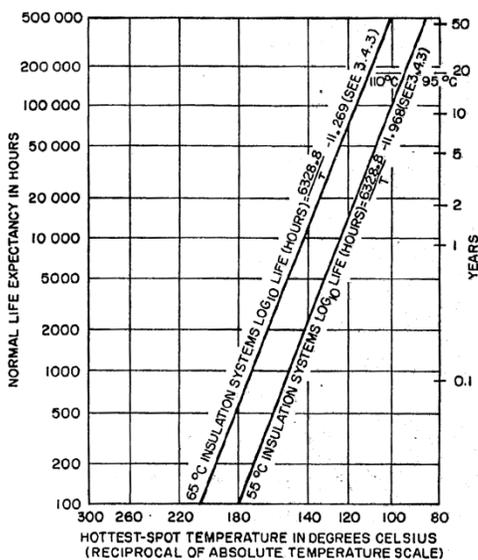
Θ_u คือ อุณหภูมิแวดล้อม, °C

K คือ ค่าอัตราส่วนของพิกัดภาระขณะใช้งานต่อ
พิกัดภาระหม้อแปลง

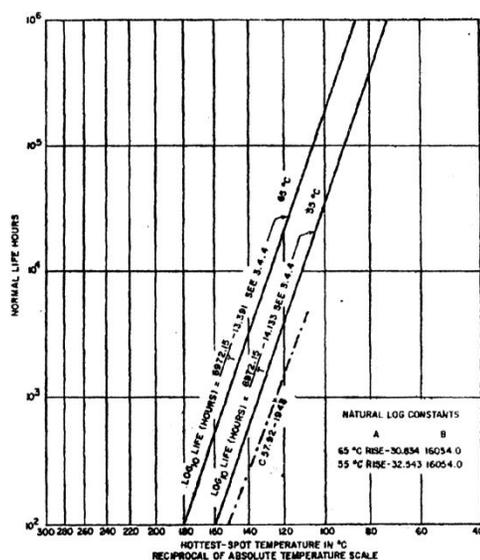
n คือ กำลังคงที่

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ A, B ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ขนาด (kVA) ต่างๆ [1-3]

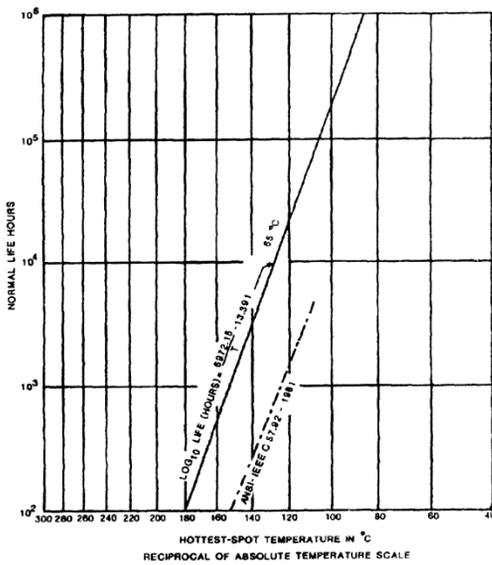
ขนาดหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C	A	B
หม้อแปลงขนาด 500 kVA และต่ำกว่า	65	-11.269	6328.8
	55	-11.968	6328.8
หม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA – 100 MVA	65	-30.834	16054.0
	55	-32.543	16054.0
หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA	65	-13.391	6972.15



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับ
อายุการใช้งานหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาด 500 kVA
และต่ำกว่า



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับ
อายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาด
มากกว่า 500 kVA ถึง 100 MVA



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลง ที่หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA

ตารางที่ 2 ชัดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในการภาวะในสภาวะมากกว่าปกติหม้อแปลง

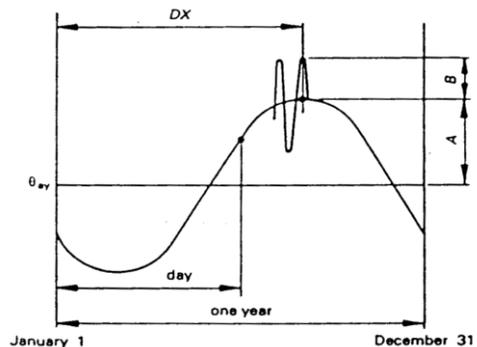
	หม้อแปลงจำหน่าย	หม้อแปลงขนาดกลาง	หม้อแปลงขนาดใหญ่
วัฏจักรภาระปกติ			
กระแส (P.U)	1.5	1.5	1.5
อุณหภูมิที่จุดร้อน (°C)	140	140	140
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (°C)	105	105	105
วัฏจักรลูกคลื่นช่วงเวลายาว ๆ			
กระแส (P.U)	1.8	1.5	1.3
อุณหภูมิที่จุดร้อน (°C)	150	140	130
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(°C)	115	115	115
วัฏจักรลูกคลื่นช่วงเวลาสั้น ๆ			
กระแส (P.U)	2.0	1.8	1.5
อุณหภูมิที่จุดร้อน (°C)	*	160	160
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(°C)	*	115	115

หมายเหตุ* ในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมช่วงเวลาระหว่างที่เกิดภาระฉุกเฉินของหม้อแปลงจำหน่ายได้ เมื่อจุดร้อนสุดมีอุณหภูมิมากกว่า 140 °C ถึง 160 °C จะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งเป็นอันตรายกับความแข็งแรงของไดอิเล็กตริกในหม้อแปลง

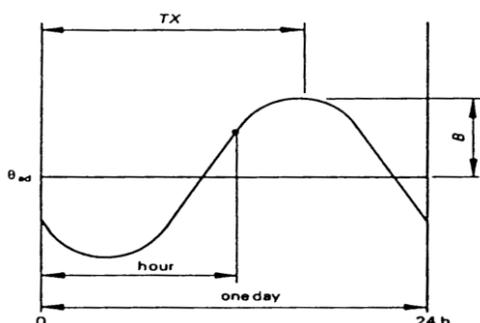
การต่อภาระหม้อแปลงนั้นจำเป็นต้องพิจารณาอุณหภูมิแวดล้อมร่วมด้วย จาก[4],[12]ได้มีการนำอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันซายน์สองชั้น (Double sinusoidal) มาร่วมการทำนาย แสดงดังสมการที่ 11 ส่วนรูปที่ 6 และรูปที่ 7 อธิบายถึงนิยามของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันอุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์สองชั้น

$$\theta_a = \theta_{ay} + A \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (\text{day} - Dx) \right] + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{24} (\text{hour} - Tx) \right] \quad (11)$$

θ_{ay} คือ อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปี, °C
 A คือ ขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำปีของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิประจำวัน, °C
 B คือ ขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำวัน, °C
 Dx คือ วันที่ร้อนที่สุดประจำปี
 Tx คือ ชั่วโมงที่ร้อนที่สุดประจำวัน
 day คือ วันที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ
 hour คือ ชั่วโมงที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ



รูปที่ 6 นิยามของพารามิเตอร์สำหรับ โดยสมการคลื่นซายน์ 2 ชั้น ในช่วงเวลา 1 ปี

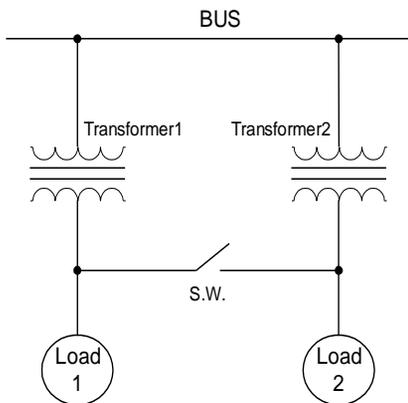


รูปที่ 7 นิยามของพารามิเตอร์สำหรับ โดยสมการคลื่นซายน์ 2 ชั้น ในช่วงเวลา 1 วัน

จากสมการที่ 11 เป็น โมเดลคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งในสมการมีพารามิเตอร์ต่างๆ (θ_{ay} , A, B, Dx) ที่จำเป็นต้องทราบ การหาพารามิเตอร์เหล่านี้ทำได้โดยการนำอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดเฉลี่ยและต่ำสุดเฉลี่ยของแต่ละเดือนในอดีตจำนวนหลายๆ ปีของพื้นที่บริเวณที่ติดตั้งหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลเบื้องต้น (ในที่นี้ได้ข้อมูลมาจากกรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย) มาใช้ในการคำนวณ

3. การจำลองและผลการจำลอง

การจำลองได้สมมติหม้อแปลงจำนวน 2 ตัว แสดงการต่อดังรูปที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว มีค่าเท่ากัน ซึ่งค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องนำมาจาก [10] แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 8 วงจรเส้นเดียวของหม้อแปลง

ตารางที่ 3 ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณ

Rated = 500 kVA	$\Theta_{or} = 55$	$\Theta_{gr} = 20$
R = 2.7	$\tau = 3.5$	n = 0.8
Max Top Oil Temp= 105 °C		Max Hottest-spot = 140 °C
Average winding Temp. rise = 65 °C		

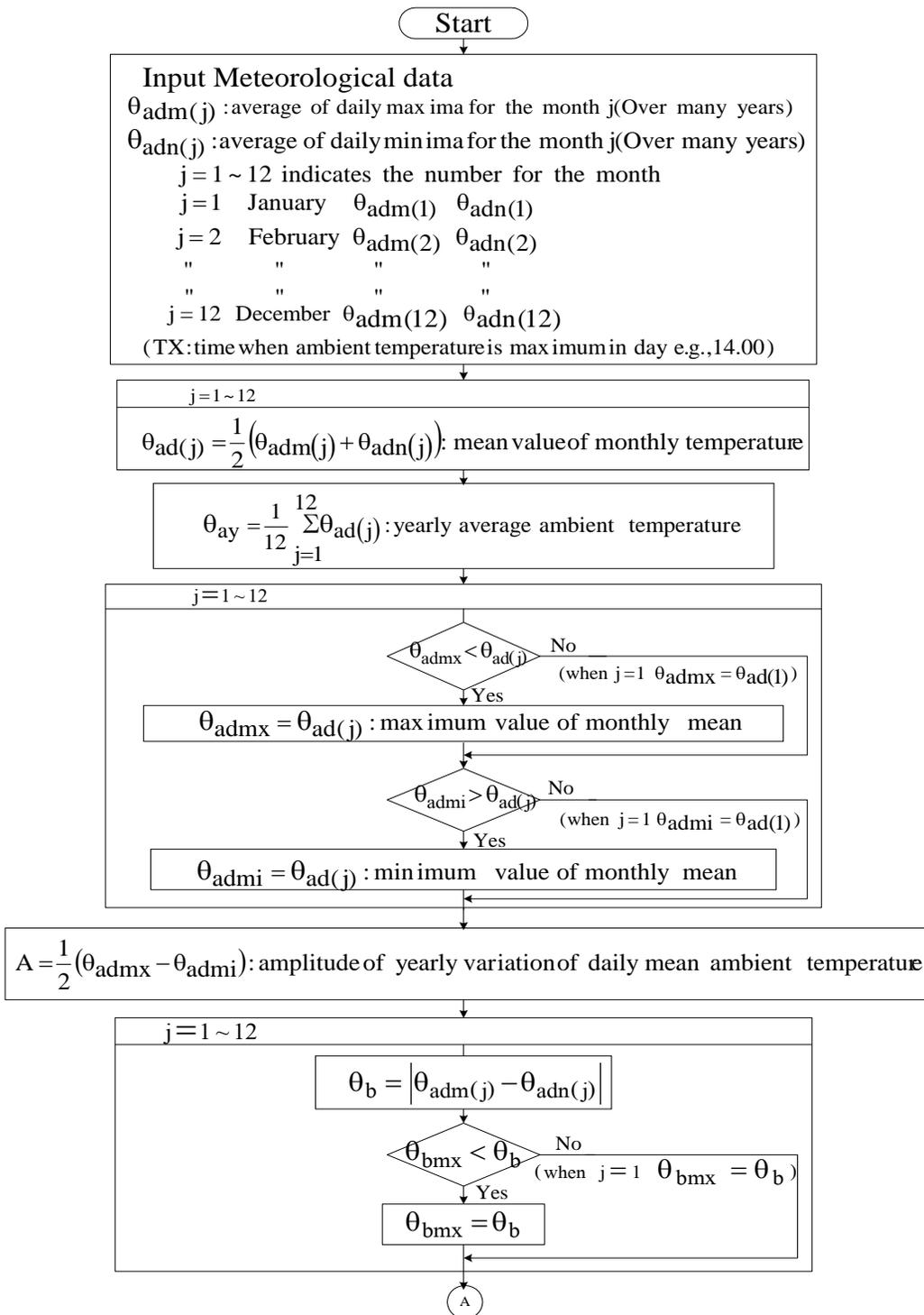
หมายเหตุค่า Max Top Oil Temp และ Max Hottest-spot จาก[1]

3.1 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุการใช้งานของหม้อแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปี

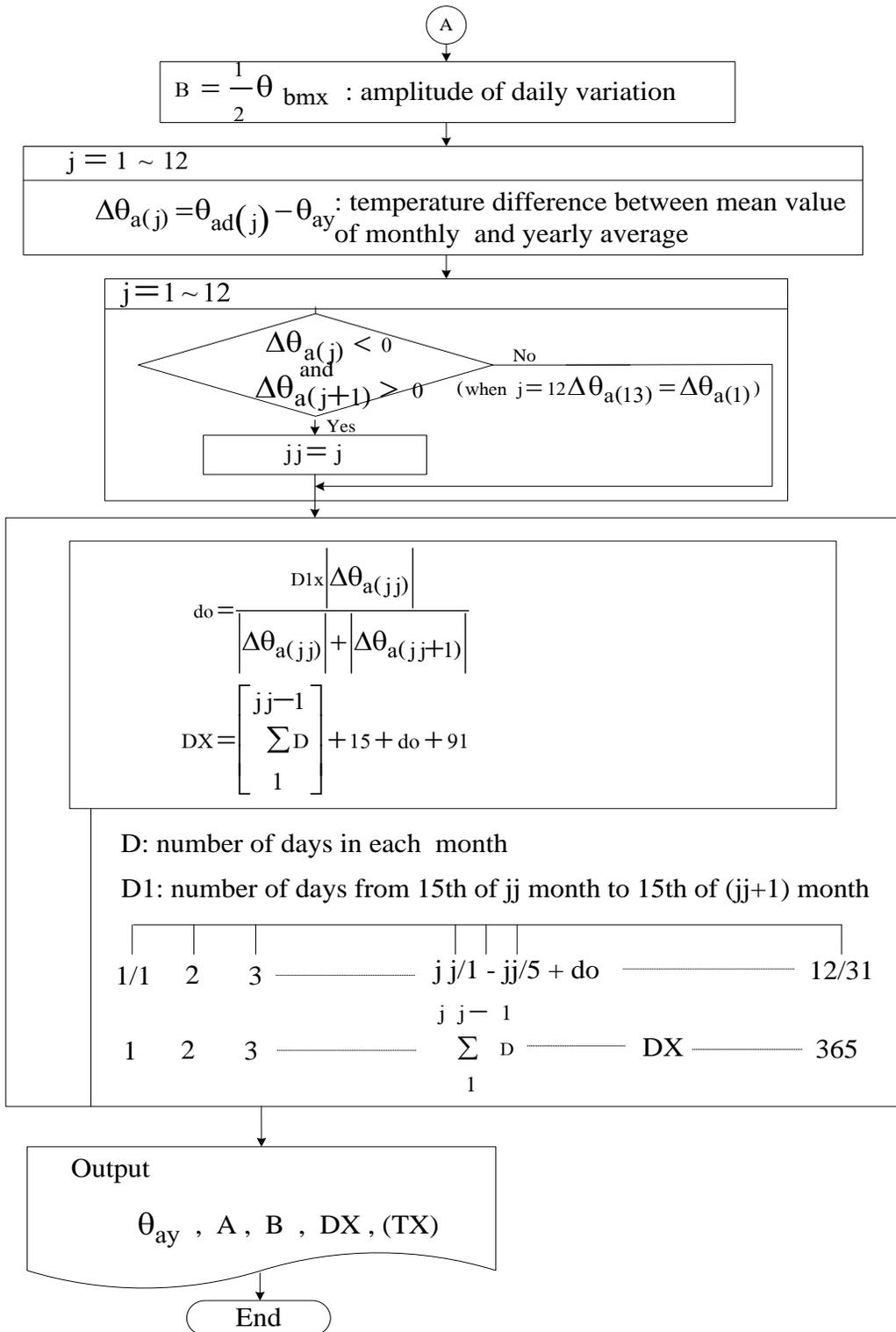
ในที่นี้เลือกพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ ซึ่งเก็บข้อมูลโดยสถานีอุตุนิยมหาวิทยาลัยกรุงเทพฯ ในปี พ.ศ.2552-2556 [11] ดังตารางที่ 4 และผู้วิจัยได้มีการพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์โดยใช้สมการต่างๆ ตามแผนผังรูปที่ 9,10 เพื่อคำนวณหา θ_{ay} , A, B และ Dx ซึ่งเมื่อมีการประมวลผลแล้วได้ค่า $\theta_{ay} = 29.77^{\circ}\text{C}$, A = 1.85, B = 4.62, Dx = 133 จาก [14] ได้ใช้ทฤษฎีหลักการความน่าจะเป็นหาค่าเวลาที่ร้อนที่สุดของแต่ละวันอยู่ที่เวลาประมาณ 14.00 น. ($T_x = 14.00$) และจาก [4] ได้ยกตัวอย่างที่เวลา 14.00 น. ไว้เช่นเดียวกัน จากนั้นได้นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงและทำนายอายุการใช้งานหม้อแปลงในปี พ.ศ. 2557 โดยใช้แผนผังรูปที่ 11 ซึ่งได้มีการพัฒนาอยู่ในรูปของโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่สามารถแสดงผลของค่าอุณหภูมิต่างๆ รวมถึง %อายุสูญเสียและอายุใช้งานของหม้อแปลงออกทางจอภาพและทางเครื่องพิมพ์และยังสามารถเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลได้อีกด้วย

ตารางที่ 4 ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บข้อมูลของสถานีอุตุนิยมวิทยากรุงเทพฯ จ. กรุงเทพมหานคร (รหัสสถานี 455201)

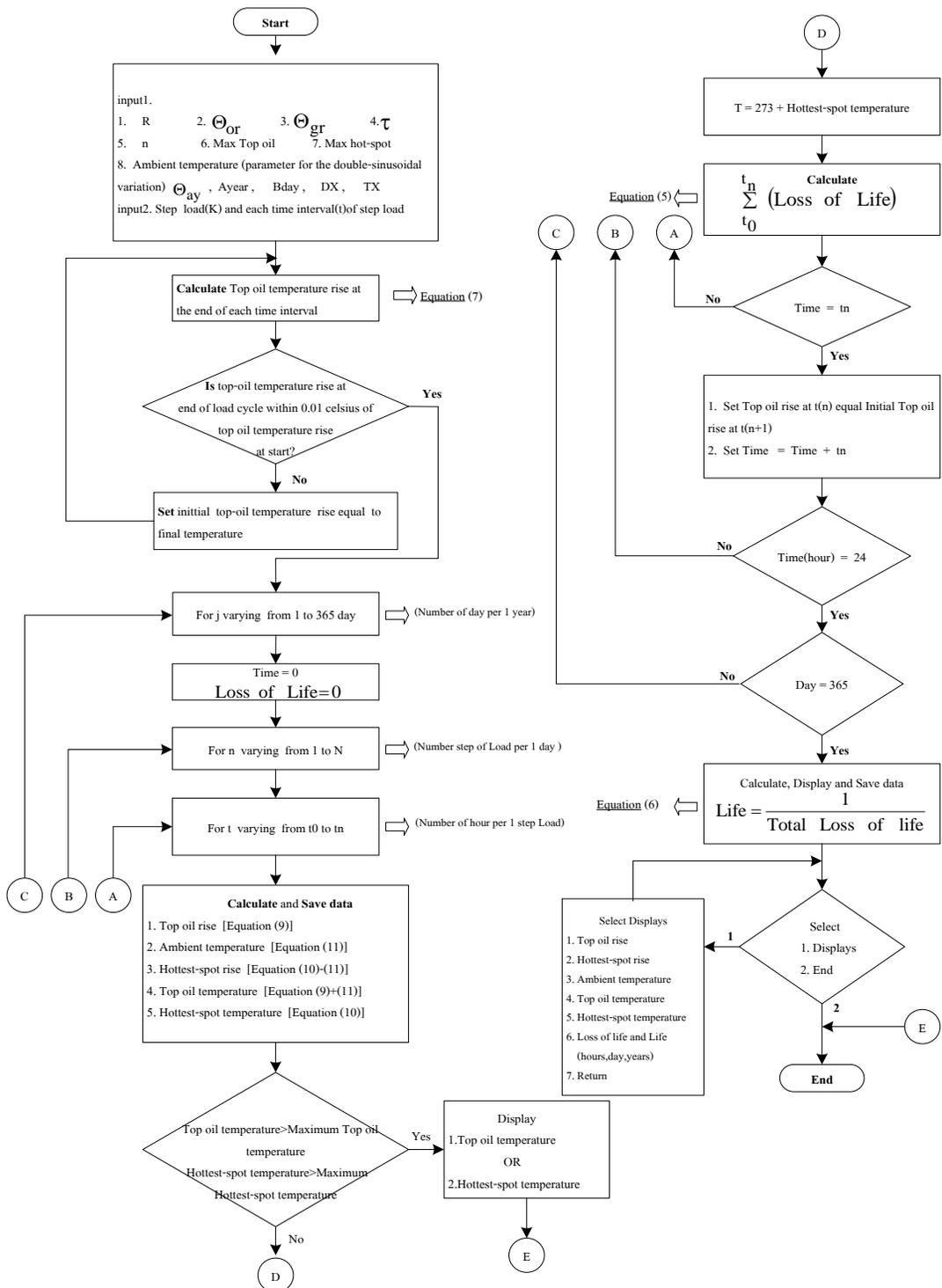
	พ.ศ.2552											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
Mean maximum (θ_{adm})	31.4	34.9	35.3	35.8	34	33.5	33.2	34.1	33.9	33.6	33.2	33.2
Mean minimum (θ_{adn})	20.8	25.1	26.4	26.3	25.9	26.3	25.9	25.7	25.4	24.9	24	23.9
	พ.ศ.2553											
	Mean maximum (θ_{adm})	32.9	33.9	35.6	36.9	36.7	35.8	34.5	33.7	33.8	32.3	32.7
Mean minimum (θ_{adn})	24.5	26.7	27.1	28.5	28.5	27.1	26.3	25.6	25.5	25	24.5	23.8
	พ.ศ.2554											
	Mean maximum (θ_{adm})	32.4	34.1	31.5	34.2	34.9	33.4	33.3	33.2	33.1	33	34.2
Mean minimum (θ_{adn})	22.6	25.2	24.1	26.1	26.5	26.7	25.6	25.8	25.7	25.3	25.6	22.8
	พ.ศ.2555											
	Mean maximum (θ_{adm})	33.1	33.6	36	36.9	35.6	34.2	33.5	33.5	32.9	33.6	33.6
Mean minimum (θ_{adn})	24.9	25.7	27.3	27.8	27.4	26.8	26.1	25.9	25.2	25.8	25.8	25.4
	พ.ศ.2556											
	Mean maximum (θ_{adm})	33.1	34.7	35.6	36.3	36.5	34.1	33	33.9	32.7	32.9	33.3
Mean minimum (θ_{adn})	23.9	26.2	27.3	27.8	27.8	26.5	26.1	26	25.5	25.3	25.3	21.1
	พ.ศ.2552 - พ.ศ.2556											
	Average Mean maximum (θ_{adm} Average)	32.58	34.24	34.8	36.02	35.54	34.2	33.5	33.68	33.28	33.08	33.4
Average Mean minimum (θ_{adn} Average)	23.34	25.78	26.44	27.3	27.22	26.68	26	25.8	25.46	25.26	25.04	23.4



รูปที่ 9 แผนผังการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุณหภูมิแวดล้อม

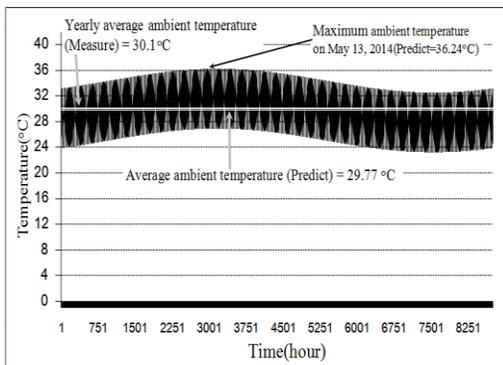


รูปที่ 10 แผนผังการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุณหภูมิแวดล้อม(ต่อ)

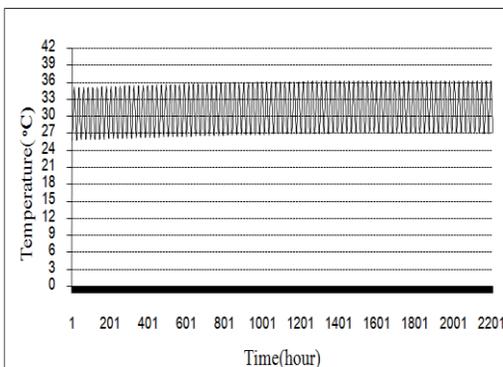


รูปที่ 11 แสดงแผนผังการคำนวณหาค่าอุณหภูมิต่าง ๆ อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

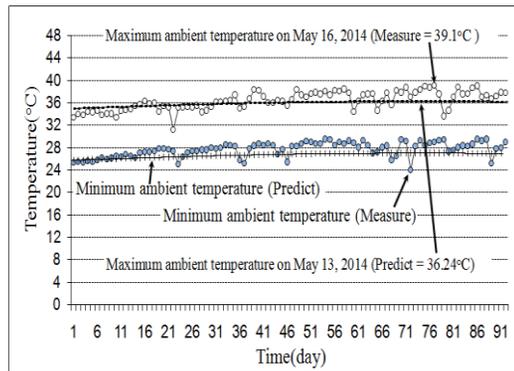
จากรูปที่ 12 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปีจากการวัดมีค่า 30.1°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทำนายที่ 29.77°C ส่วนรูปที่ 13 เป็นกราฟอุณหภูมิแวดล้อมจากการทำนายช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูงของปี (มี.ค.-พ.ค.) จากรูปที่ 14 เป็นกราฟอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จากการทำนายเปรียบเทียบกับการวัด ซึ่งผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกันโดยประมาณ โดยมีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดระยะเวลา 3 เดือนเท่ากับ 3.23% รูปที่ 15 เป็นกราฟอุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ 13 พ.ค.2557 มีค่าสูงสุดจากการทำนาย 36.24°C จากการวัดมีค่า 38.3°C ส่วนค่าเฉลี่ยรายวันจากการทำนาย 33.8°C และค่าที่ได้จากการวัด 31.62°C



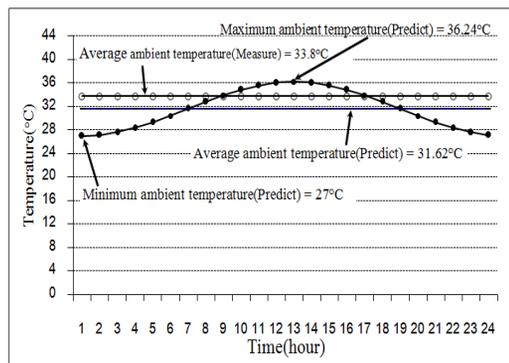
รูปที่ 12 อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละชั่วโมงตลอดปี พ.ศ. 2557 (8,760 ชั่วโมง)



รูปที่ 13 อุณหภูมิแวดล้อมที่ทำนายของเดือน มี.ค.- พ.ค. พ.ศ.2557 (เดือนที่ร้อนมาของปี)



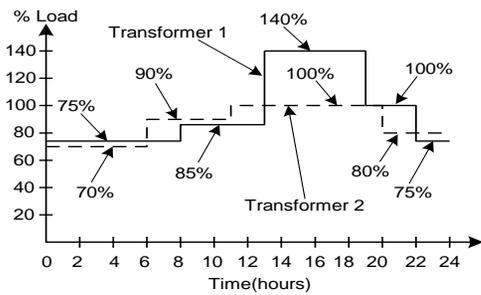
รูปที่ 14 อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละวัน ช่วงวันที่ 1 มี.ค. ถึง 31 พ.ค. พ.ศ. 2557 (92 วัน)



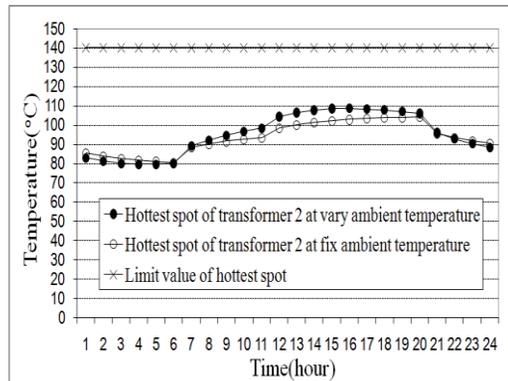
รูปที่ 15 ค่าอุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและค่าเฉลี่ยรายวันของวันที่ 13 พ.ค. 2557 จากการทำนายและจากการวัด

จากรูปที่ 16 เป็นวัฏจักรภาระของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัวที่แยกกันจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการสมมติว่าหม้อแปลงตัวที่ 1 เกิดมีการเกินบางช่วงเวลา (ชั่วโมงที่ 13 ถึงชั่วโมงที่ 19) และหม้อแปลงตัวที่ 2 ไม่มีมีการเกินตลอด 24 ชั่วโมง

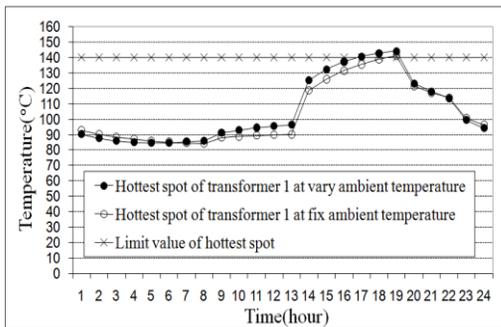
ส่วนรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 20 เป็นการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงของวันที่ 13 พ.ค. 2557 เห็นได้ว่าการคำนวณค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดและอุณหภูมิน้ำมันด้านบนจากการใช้โมเดลอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันซายน์สองชั้นมีค่าสูงกว่าการใช้โมเดลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปีและจากตารางที่ 5 ค่าอายุการใช้งานของหม้อแปลงตัวที่ 1 ที่คำนวณได้แตกต่างกันถึง 1.41 ปี (ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ 23%) ส่วนหม้อแปลงตัวที่ 2 มีค่าเท่ากับ 20 ปี



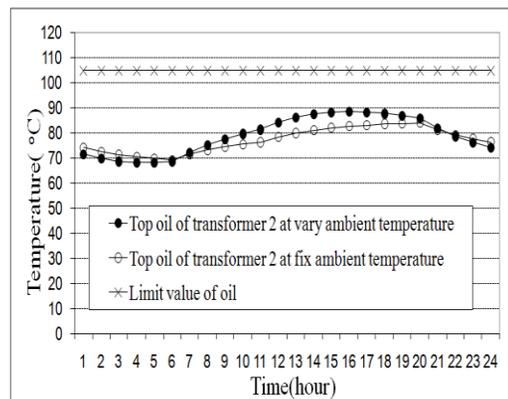
รูปที่ 16 วิถีการภาระของหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว



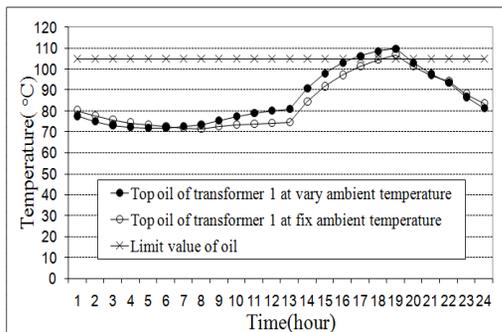
รูปที่ 19 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดหม้อแปลงตัวที่ 2 ของวันที่ 13 พ.ค. 2557



รูปที่ 17 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงตัวที่ 1 ของวันที่ 13 พ.ค. 2557



รูปที่ 20 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนหม้อแปลงตัวที่ 2 ของวันที่ 13 พ.ค. 2557



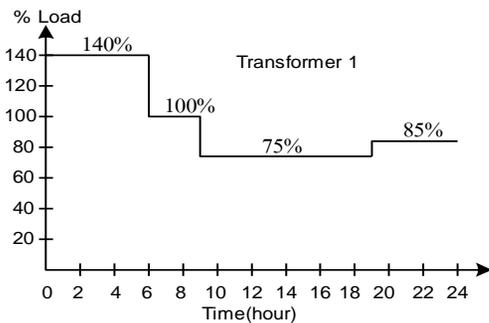
รูปที่ 18 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนหม้อแปลงตัวที่ 1 ของวันที่ 13 พ.ค. 2557

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบ % อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งาน

	อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.)	%อายุที่สูญเสีย (%Loss of Life)	อายุการใช้งาน (Lifetime)
หม้อแปลง 1	เฉลี่ยรายปี	13.2819	7.529 ปี
หม้อแปลง 1	เปลี่ยนแปลงตลอดปี	16.3331	6.123 ปี
หม้อแปลง 2	เฉลี่ยรายปี	1.1836	20 ปี
หม้อแปลง 2	เปลี่ยนแปลงตลอดปี	1.4765	20 ปี

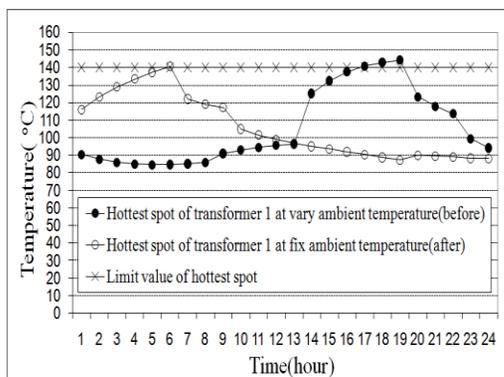
3.2 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุการใช้งาน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการจ่ายภาระของหม้อแปลง

ในกรณีที่สามารปรับช่วงเวลาการจ่ายภาระของหม้อแปลงได้ โดยปรับช่วงภาระที่มีค่าสูง ๆ ไว้ในช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำสุดของวัน ซึ่งแสดงวัฏจักรภาระของหม้อแปลง 1 ที่มีการปรับเปลี่ยนเวลาจากรูปที่ 16 เป็นรูปที่ 21

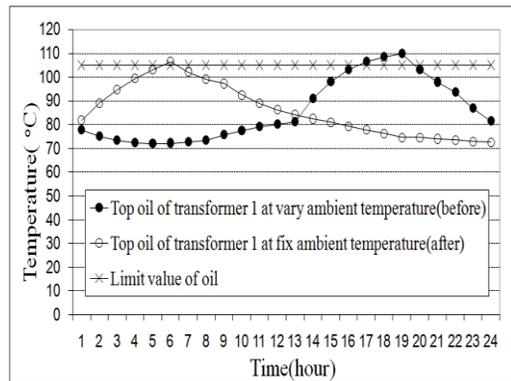


รูปที่ 21 การปรับเปลี่ยนเวลาของวัฏจักรภาระหม้อแปลง

ผลการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการจ่ายภาระของหม้อแปลงตัวที่ 1 ทำให้อุณหภูมิจุดร้อนสุดและอุณหภูมิน้ำมันด้านบนลดต่ำลงดังรูปที่ 22 และรูปที่ 23 เรียงตามลำดับ ส่งผลให้ลดค่า %อายุที่สูญเสียและช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงมีค่าขึ้นยาวขึ้นอีก 3.47 ปี แสดงได้ดังและตารางที่ 6



รูปที่ 22 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุด ก่อน / หลัง ปรับเวลาภาระของวันที่ 13 พ.ค. 2557



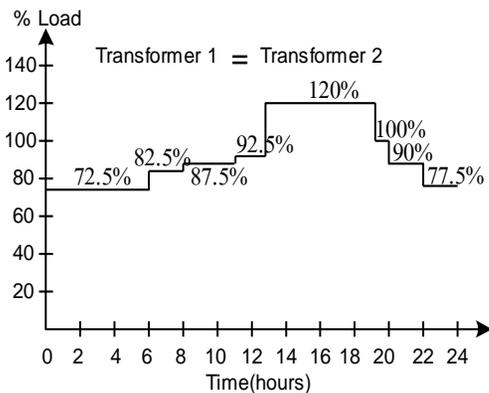
รูปที่ 23 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบน ก่อน / หลัง ปรับเวลาภาระของวันที่ 13 พ.ค. 2557

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบ %อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งาน

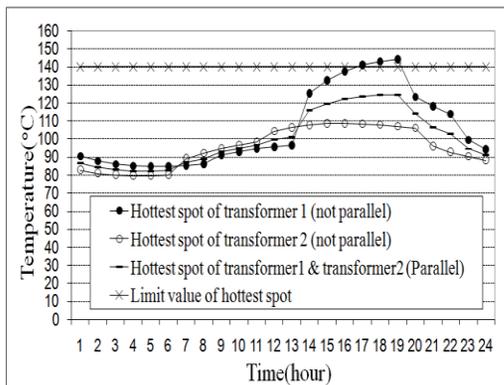
	%อายุที่สูญเสีย (%Loss of Life)	อายุการใช้งาน (Lifetime)
หม้อแปลง 1 (ก่อนปรับเวลา)	16.3331	6.122554 ปี
หม้อแปลง 1 (หลังปรับเวลา)	10.4267	9.590799 ปี

3.3 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุการใช้งาน เมื่อมีการขนานหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว

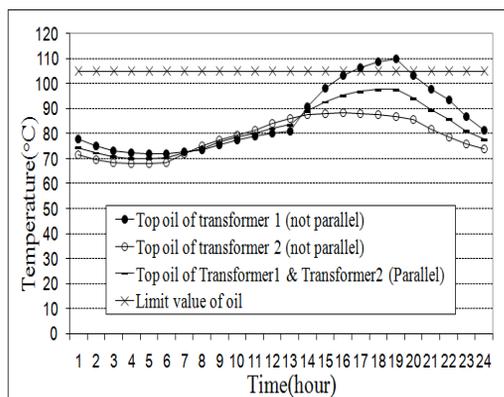
ในกรณีที่มีการขนานหม้อแปลงทั้ง 2 ตัว ทำให้วัฏจักรภาระของรูปที่ 16 ถูกปรับเปลี่ยนเป็นวัฏจักรภาระรูปที่ 24 ส่งผลทำให้อุณหภูมิจุดร้อนสุดและอุณหภูมิน้ำมันด้านบนของหม้อแปลงตัวที่ 1 ลดต่ำกว่าขีดจำกัดแสดงดังรูปที่ 25 และรูปที่ 26 เรียงตามลำดับและจากตารางที่ 7 เห็นได้ว่าจะสามารถลด %อายุที่สูญเสียของหม้อแปลงตัวที่ 1 ลงได้ ทำให้หม้อแปลงตัวที่ 1 มีอายุการใช้งานถึง 20 ปี ส่วนหม้อแปลงตัวที่ 2 นั้นถึงแม้ว่า %อายุที่สูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นก็จริงแต่ยังมีอายุการใช้งาน 20 ปี เช่นเดิม ทั้งนี้เพราะจ่ายภาระไม่เกิน 100 %



รูปที่ 24 วิถีจักรภาระ เมื่อมีการขนานหม้อแปลง



รูปที่ 25 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดไม่ขนาน/ขนานของวันที่ 13 พ.ค. 2557



รูปที่ 26 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนไม่ขนาน/ขนานของวันที่ 13 พ.ค. 2557

ตารางที่ 7 %อายุที่สูญเสียและอายุการใช้งาน

	%อายุที่สูญเสีย (%Loss of Life)	อายุการใช้งาน (Lifetime)
หม้อแปลง1(ไม่ขนาน)	16.3331	6.122554 ปี
หม้อแปลง2(ไม่ขนาน)	1.4765	20 ปี
หม้อแปลง1=2 (ขนาน)	4.1217	20 ปี

4. สรุป

จากผลการจำลองแบ่งสรุปได้ดังนี้ 1. การนำค่าอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันซายน์สองชั้นมาประกอบการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงนั้น จะให้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากกว่าการใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยรายปี 2. โดยปกติหม้อแปลงจะจ่ายภาระอย่างเบาบางในช่วงเวลากลางคืน แต่มีบางกรณีที่สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้หม้อแปลงมีภาระสูงๆ อยู่ใน ช่วงเวลากลางคืนได้ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่มีพนักงานทำงานเป็นแบบหลายช่วงเวลา (แบบเป็นกะ) การทำงานของหม้อแปลงในลักษณะนี้จะทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้ (กลางคืนมีอุณหภูมิแวดล้อมต่ำกว่ากลางวัน) และจากผลการจำลองกรณีดังกล่าวนี้ หม้อแปลงตัวที่ 1 มีค่า %อายุที่สูญเสียลดลง ส่งผลให้สามารถยืดอายุการใช้งานได้อีกประมาณ 3.47 ปี ส่วนหม้อแปลงตัวที่ 2 ทั้งก่อนปรับและหลังปรับช่วงเวลาการจ่ายภาระมีอายุการใช้งาน 20 ปี 3. เมื่อขนานหม้อแปลงทั้ง 2 ตัวจะช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้ เช่น อายุเฉลี่ยของหม้อแปลงก่อนขนานหม้อแปลงมีค่าประมาณ $(6.123+20)/2 = 13.0615$ ปี แต่หลังจากขนานหม้อแปลงมีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่ 20 ปี ซึ่งเห็นได้ว่าการยืดอายุของหม้อแปลงได้อีก 6.939 ปี ดังนั้นการต่อภาระหม้อแปลงถ้านำเรื่องความร้อนมาพิจารณาด้วยจะทำให้ช่วยยืดอายุหม้อแปลง และสามารถเพิ่มขีดจำกัดในการต่อภาระรวมถึงผลลัพธ์ของการทำนายยังเป็นตัวแปรที่

ช่วยในเรื่องการวางแผนการผลิตและเรื่องเศรษฐศาสตร์อีกด้วย เช่น จากผลลัพธ์ของตารางที่ 5 เมื่อมีการขนานหม้อแปลงทั้งสองเข้ากันแล้วทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงเท่ากับ 20 ปี แต่ถ้าหม้อแปลงทั้งสองแยกกันจ่ายภาระที่หม้อแปลงตัวที่ 1 มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 6.123 ปี ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อหม้อแปลงตัวใหม่และต้องปรับแผนการผลิตใหม่อีก ซึ่งก็หมายความว่าต้องเพิ่มงบประมาณในการลงทุนมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise, ANSI/IEEE C57.91-1981.
- [2] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted power transformers, up to and including 100 MVA with 65°C or 55°C average winding rise, ANSI/IEEE C57.92-1981.
- [3] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted power transformers rated in excess of 100 MVA 65°C winding rise, ANSI/IEEE C57.115-1981.
- [4] Loading guide for oil immersed power transformer, 1991, IEC 354.
- [5] L. W. Pierce, "An Investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp.1347-1357, Jul. 1992.
- [6] S. Tadsuan, V. Kinnares, N. Kritsanajinda, S. Banjongjit, and B. Suechoey, "Testing of temperature at conductor and oil of mineral-oil-immersed transformer in order to be the criterion for transformer design," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 23, no.2, pp.59-77, May 2000 (in Thai).
- [7] D. Susa and H. Nordman, "A Simple model for calculating transformer hot-spot temperature," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no.3, pp.1257-1264, Jul. 2009.
- [8] M. K. Pradhan and T. S. Ramu, "Prediction of hottest spot temperature(HST) in power and station transformers," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 18, no.4, pp.1275 -1283, Oct. 2003.
- [9] M. Srinivasan and A. Krishnan, "Effects of environmental factors in transformer's insulation life," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 8, no.1, pp.35-44, Jan. 2013.
- [10] S.L. Cress, "Transformer loss-of-life calculation using a computerized probabilistic method," in Proc. *The 10th International Conference on Electricity Distribution* vol. 1 May 1989, pp.57-61.
- [11] Agroclimatological data (2009-2014), bangkok meteorological station.
- [12] S. Tadsuan, "Testing and planning of load of oil-immersed transformer when non-linear load condition in bangkok and surrounding Area," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 31, no.2, pp. 335-356, Apr. 2008(in Thai).
- [13] T. Tejar, S. Tadsuan, and S. Tapeantong, "The development of temperature monitoring instrument for studying heat at terminal junction of oil immersed distribution transformers of

PEA,” in Proc. 31st *Electrical Engineering Conference (EECON-37)*, 19-21 Nov. 2014, pp. 137-140 (in Thai).

- [14] J. A. Jardini, H. P. Schmidt, C. M. V. Tahan, C. C. B. de Oliveira, and S. U. Ahn, “Distribution transformer loss of life evaluation: A novel approach based on daily load profiles,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 15, no.1, pp. 361-366, Jan. 2000.

ประวัติผู้ประพันธ์



สิริวิษ ทัตสวน : สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม.ไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า งานวิจัยที่สนใจได้แก่คุณภาพไฟฟ้า กำลัง การศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียและความร้อนใน เครื่องจักรกลไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบสมองกล ผังตัว การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับ เครื่องจักรกลไฟฟ้า



สุกเดช ตะเพียนทอง: สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี (วศ.บ. ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเอเชีย อากเนย์ปัจจุบันกำลังศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอากเนย์ งานวิจัยที่ สนใจได้แก่คุณภาพไฟฟ้ากำลัง การศึกษากำลังไฟฟ้า สูญเสียและความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบสมอง กลผังตัว