การตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยกระแสรั่วไหล

Monitoring of High Voltage Equipment by using Leakage Current

ช่อผกา แผลงประพันธ์[1)] และ ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช[2)]

Chorphaka Plaengpraphan[1)] and Nutthaphong Tanthanuch[2)]

[1)]โครงการหลักสูตรนวัตกรรมทางวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

[2)]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

เนื่องจากเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังทำงานได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ การตรวจสอบความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวจึงมีความสำคัญ การตรวจสอบความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีหลายวิธี เช่น การทดสอบแรงดันเสิร์จ การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบการปลดปล่อยประจุบางส่วน และการทดสอบค่าประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน โดยการตรวจสอบทั้งหมดที่กล่าวมาจะกระทำในขณะอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าหยุดการทำงาน ต้องมีการตัดวงจรไฟฟ้า หรือปลดอุปกรณ์ออกจากระบบ จึงเป็นวิธีที่ไม่สะดวกและเสียเวลาในการดำเนินการ ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์และระบบเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการตรวจสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในขณะทำงาน จึงมีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งส่วนใหญ่วิธีการตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ในขณะทำงานจะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจวัดกระแสรั่วไหล เนื่องจากขนาดและรูปคลื่นขององค์ประกอบกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานจะขึ้นกับลักษณะการเสื่อมสภาพวัสดุฉนวน ดังนั้นกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานจึงถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินระดับความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

คำสำคัญ: อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ความเสื่อมสภาพ กระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน

Abstract

Due to the fact that stability and reliability of the power system are important, the high voltage equipment installed in the generation and transmission systems have to work correctly. Thus, the monitoring of deterioration and degradation of these devices are necessary. There are many methods to investigate the condition of the equipment for example, surge test, insulation resistance test, partial discharge test, capacitance and dissipation factor test, and etc. Normally, tested equipment is inspected in offline condition that means it must be disconnected from the system. These methods are inconvenience and time consuming. In order to improve the implementation process and collect data, the online condition monitoring is proposed. Most online methods are based on measuring of leakage current. The value and waveform of leakage current, especially a resistive component, depend on the deterioration of insulating materials. Therefore, the resistive leakage current is an importance parameter used to assess the degradation of the high voltage equipment.

Keywords: High voltage equipment, Deterioration and degradation, Resistive leakage current

1. บทนำ

ระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหลายชนิด เพื่อใช้ควบคุมและป้องกันให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือ ยกตัวอย่างเช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ ทำหน้าที่ป้องกันการใช้ไฟฟ้าเกินพิกัด และป้องกันกระแสลัดวงจร ลูกถ้วยฉนวน ทำหน้าที่รองรับสายไฟและแยกส่วนระหว่างส่วนนำไฟฟ้าและส่วนที่ต่อลงดิน กับดักฟ้าผ่า ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันเกิน เป็นต้น หากอุปกรณ์เหล่านี้เกิดการเสื่อมสภาพหรือชำรุดเสียหายเนื่องมาจากการรับแรงดันและกระแสมีค่าสูงเกินกว่าพิกัด การเกิดคราบสิ่งสกปรกบนพื้นผิว หรือการรับแรงทางกล ทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องหยุดชะงัก เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าลดลง เพื่อเป็นการลดและแก้ปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงควรมีการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งอยู่ในระบบ หากพบว่าเกิดการชำรุดหรือเสื่อมสภาพ ต้องมีการซ่อมบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนออก เพื่อให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุด

การตรวจสอบและประเมินสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมีหลายวิธี ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบ ในขณะอุปกรณ์ดังกล่าวหรือระบบไฟฟ้าหยุดการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบแรงดันเสิร์จ การทดสอบความต้านทานฉนวน การทดสอบการปลดปล่อยประจุบางส่วน และการทดสอบค่าประกอบกำลังสูญเสียของฉนวน เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่สะดวก เนื่องจากต้องทำการดับไฟ มีการติดต่อประสานงานระหว่างผู้จำหน่ายและผู้ใช้ไฟฟ้า และใช้เวลานานในการทำทดสอบแต่ละครั้ง ดังนั้นการตรวจวัดและประเมินในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงยังทำงาน จึงมีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะอยู่บนพื้นฐานของการตรวจวัดกระแสรั่วไหลที่ไหลบนวัสดุฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

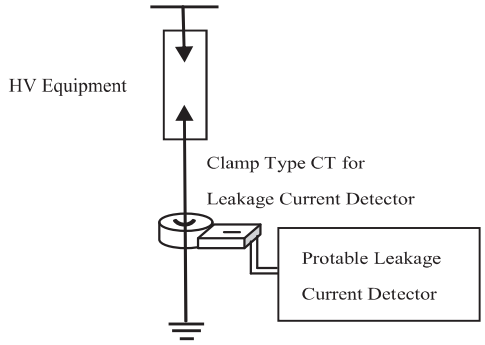
เนื่องจากวัสดุฉนวนที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าแรงสูงไม่ได้เป็นฉนวนที่สมบูรณ์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวน จะเกิดกระแสไหลผ่านผิวหรือเนื้อของฉนวน ซึ่งกระแสที่ไหลนี้ประกอบด้วยกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน และกระแสรั่วไหลเชิงตัวเก็บประจุ โดยปกติกระแสดังกล่าวจะมีปริมาณน้อยมาก มีค่าเป็นไมโครแอมป์ ไม่ส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติ แต่อาจทำให้เกิดอันตรายกับคนได้ ถ้าไปสัมผัสกับบริเวณที่เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงของขนาดกระแสรั่วไหล ในส่วนของกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การแตกร้าวของผิวฉนวนเนื่องมาจากสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความชื้นสูง การเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน เนื่องมาจากสิ่งสกปรกหรือสิ่งเปรอะเปื้อน และการแตกหักของเนื้อฉนวนเนื่องมาจากการรับแรงทางกลที่เกินพิกัดเป็นเวลานาน เป็นต้น ซึ่งทำให้ความต้านทานของฉนวนมีค่าลดลง กระแสรั่วไหลมีขนาดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิขณะทำงานหรือความร้อนสะสมของอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลงโดยเฉพาะในกรณีที่เกิดการปลดปล่อยประจุบางส่วน จะทำให้เกิดสัญญาณความถี่สูงแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบ สื่อสาร และที่สำคัญที่สุดคือ ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง [1]

จากที่กล่าวมาในข้างต้น จะเห็นว่าขนาดกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน จะแปรตามการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน ดังนั้นกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานจึงถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินระดับความเสียหายของอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง

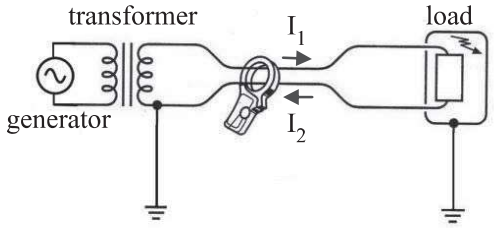
2. การวัดกระแสรั่วไหล

การวัดกระแสรั่วไหลมีอยู่หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การใช้มิเตอร์กระแส หรือหม้อแปลงกระแส วิธีนี้จะทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านสายดินลงสู่พื้นดิน โดยทำการคล้องมิเตอร์กระแสหรือหม้อแปลงกระแสเข้ากับสายดินโดยตรง แล้วอ่านค่ากระแสรั่วไหล ดังแสดงในรูปที่ 1



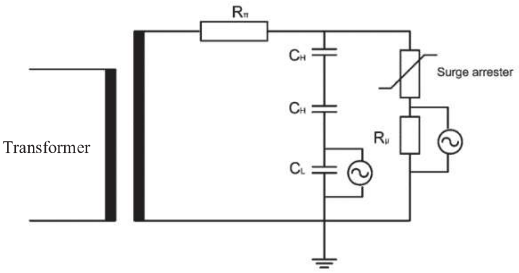
รูปที่ 1 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้หม้อแปลงกระแส [2]

หรือทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าและออกอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยคล้องมิเตอร์กระแสเข้ากับสายไฟเส้นที่กระแสไหลเข้าและไหลออกจากอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ในสภาวะปกติกระแสที่เข้า I_1 และกระแสที่ออก I_2 จะมีค่าเท่ากัน ทำให้ผลต่างของกระแสมีค่าเป็นศูนย์ กระแสที่อ่านได้จากมิเตอร์จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อมีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นจะทำให้กระแส I_1 และกระแส I_2 มีค่าไม่เท่ากัน มิเตอร์จะนำผลต่างที่เกิดขึ้นนี้มาแปลงเป็นค่าที่สามารถอ่านได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหล



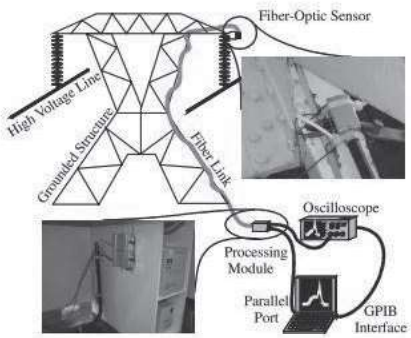
รูปที่ 2 การวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้มิเตอร์วัดความต่างของกระแสไหลเข้าและกระแสไหลออกอุปกรณ์ไฟฟ้า

วิธีการวัดกระแสรั่วไหลโดยใช้ความต้านทานชันท์ โดยมีวิธีการวัด แสดงดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วัดกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานชันท์ (R_μ) [3]

จากรูปที่ 3 ทำการป้อนแรงดันให้กับอุปกรณ์ที่จะทำการทดสอบ จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันผ่านอุปกรณ์ลดทอนแรงดัน (C_H, C_L) และความต้านทานชันท์ (R_μ) ตามลำดับ เมื่อ R_π เป็นความต้านทานจำกัดกระแส โดยกระแสรั่วไหลหาได้จากกฎของโอห์ม คือ นำแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานชันท์หารด้วยค่าความต้านทานชันท์ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีวัดค่ากระแสที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากสามารถควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรทดสอบได้ แต่อย่างไรก็ตาม การวัดกระแสรั่วไหลด้วยวิธีนี้ ต้องมีการปลดอุปกรณ์ออกจากระบบเพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนาระบบการวัดกระแสรั่วไหลในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้ายังคงทำงาน โดยใช้ Fiber Optic Sensor ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้กับอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัด เช่น บริเวณส่วนปลายของพวงลูกถ้วยฉนวนที่ยึดติดกับโครงเสาไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4

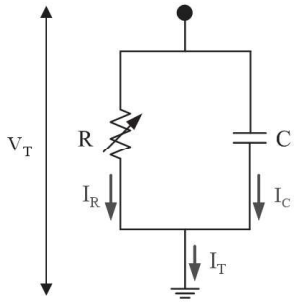


รูปที่ 4 การใช้ Fiber Optic Sensor ตรวจจับกระแสรั่วไหล [4]

จากรูปที่ 4 Fiber Optic Sensor จะทำการตรวจจับและส่งสัญญาณกระแสรั่วไหลเข้ามายังระบบประมวลผล เพื่อทำการวิเคราะห์ และแสดงผลการตรวจวัดบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และ Oscilloscope

3. แบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

โดยทั่วไปแบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงประกอบด้วยความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าแรงสูง [5]

จากรูปที่ 5 กระแสรั่วไหลรวม (I_T) ที่ไหลผ่านฉนวนไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบความต้านทาน (I_R) และกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบค่าเก็บประจุ (I_C) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$I_T = I_R + I_C \tag{1}$$

4. การวิเคราะห์กระแสรั่วไหล

จากการศึกษางานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง สามารถแบ่งวิธีการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลออกได้เป็น 3 วิธี [6,7]

4.1 Improve Compensate Method

ทำการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยอ้างอิงแบบจำลองในรูปที่ 5 ข้อมูลสัญญาณแรงดัน (V_T) และกระแสรั่วไหล (I_T) จะถูกวิเคราะห์และแยกองค์ประกอบเป็นสัญญาณที่*ความถี่*ต่างๆ ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$V_T(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n sin(n\omega t + \alpha_n) \tag{2}$$

$$i_T(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n sin(n\omega t + \beta_n) \tag{3}$$

เมื่อ V_0 คือ องค์ประกอบแรงดันกระแสตรง

I_0 คือ องค์ประกอบกระแสตรงของกระแสรั่วไหล

V_n คือ แรงดันค่ายอดของฮาร์มอนิกลำดับที่ n

I_n คือ กระแสค่ายอดจากฮาร์มอนิกลำดับที่ n

α_n คือ มุมเฟสของแรงดันของฮาร์มอนิกลำดับที่ n

β_n คือ มุมเฟสของกระแสจากฮาร์มอนิกลำดับที่ n

ω คือ ความถี่เชิงมุมของระบบไฟฟ้า

กระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ หาได้จากสมการที่ (4)

$$i_{R,n}(t) = i_{T,n}(t) - G_n V_{sf,n}(t) \tag{4}$$

โดยที่ G_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ชดเชยฮาร์มอนิกลำดับที่ n ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$\int_0^T \left[V_{sf,n}(t) \times \left(I_{T,n}(t) - G_n V_{sf,n}(t) \right) \right] dt = 0 \tag{5}$$

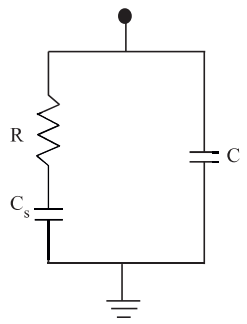
เมื่อ $V_{sf,n}(t)$ คือ แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ n ที่เลื่อนเฟสไปข้างหน้า 90 องศา

$I_{T,n}(t)$ คือ กระแสรั่วไหลรวมฮาร์มอนิกลำดับที่ n

$i_{R,n}(t)$ คือ กระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานฮาร์มอนิกลำดับที่ n

4.2 Accurate Model Analysis Method

การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลด้วยวิธี Accurate Model Analysis Method จะใช้วงจรสมมูลของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงที่มีการปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 6 โดยเพิ่มตัวเก็บประจุชดเชย (series compensate capacitance) ต่ออนุกรมกับความต้านทานแบบไม่เชิงเส้น (non-linear resistance) เพื่อทำให้กระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะคล้ายกับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นข้างบนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น



รูปที่ 6 แบบจำลองของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงที่มีการปรับปรุง

จากแบบจำลองในรูปที่ 6 กระแสรั่วไหลรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$I_T(t) = I_R(t) + C\frac{dV_T(t)}{dt} \quad (6)$$

โดยสามารถหาค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน I_R ได้จากสมการที่ (7)

$$I_R(t) = I_{c_s}(t) = I_T(t) - C\frac{dV_T(t)}{dt} \quad (7)$$

4.3 Modified Time Shifted Method

ทำการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลโดยใช้แบบจำลองฉนวนเช่นเดียวกับวิธี Improve Compensate Method ทำการหาค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานได้จากการนำกระแสรั่วไหลทั้งหมดลบด้วยกระแสรั่วไหลเชิงตัวเก็บประจุ ซึ่งกระแสรั่วไหลเชิงตัวเก็บประจุได้มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสรั่วไหลรวมกับไหลรวมที่ทำการเลื่อนเวลาไปข้างหน้าหนึ่งในสี่คาบ ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$I_S = I_T + I_T\left(t - \frac{T}{4}\right) \quad (8)$$

ทำการหาเวลาค่ายอดของกระแสรั่วไหลเชิงตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ (9)

$$t_{C_{peak}} = t_{R_{peak}} - \frac{T}{4} \quad (9)$$

เมื่อ $t_{R_{peak}}$ คือ เวลาค่ายอดของกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานที่ได้จากสมการที่ (8) จากนั้นทำการจำลองคลื่นกระแสรั่วเชิงตัวเก็บประจุ โดยใช้สมการที่ (10)

$$I_C = I_{C_{peak}}\cos(2\pi ft) \quad (10)$$

และทำการคำนวณหากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานจากสมการ

$$I_R(t) = I_T(t) - I_C(t) \quad (11)$$

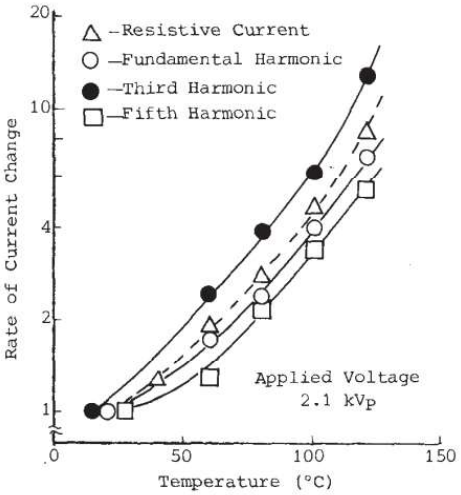
ในปัจจุบันได้มีการนำหลักการทั้ง 3 วิธี ไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมการวัดและวิเคราะห์กระแสรั่วไหลโดยอาศัยซอฟแวร์สำเร็จรูปต่างๆ ที่มีใช้กันทั่วไปในงานด้านวิศวกรรม เช่น Matlab, C^{++}, python และ Labview ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเป็นอุปกรณ์หรือระบบตรวจวัดกระแสรั่วไหลที่มีขนาดเล็กลงหรือพกพาได้ [8] ทำให้สามารถลดข้อจำกัดในการทำงานและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในอนาคต

5. การตรวจสอบความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์โดยใช้กระแสรั่วไหล

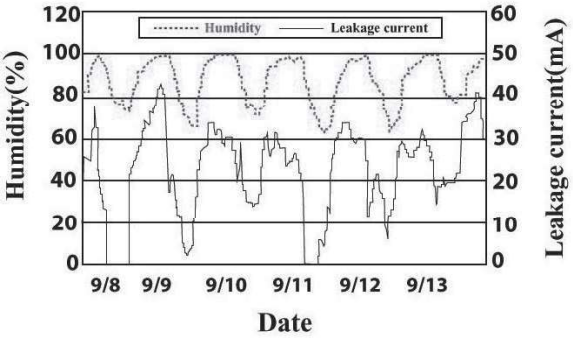
จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน สามารถตรวจสอบได้จากกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทาน เช่น ขนาดและองค์ประกอบความถี่ต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ อันได้แก่

- สิ่งเปรอะเปื้อน กรณีที่มีผง ฝุ่นละออง หรือเศษทรายมาเกาะผิวฉนวน หรือมีความชื้นเข้าไปในอุปกรณ์ไฟฟ้า จะทำให้ค่าความต้านทานฉนวนต่ำลง ส่งผลให้ค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้กระแสรั่วไหลรวมมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยทั่วไปจะมีมาตรฐานกำหนดว่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานของอุปกรณ์ไฟฟ้าภาวะปกติควรมีค่าไม่เกินเท่าไร ตัวอย่างเช่น กับดักฟ้าผ่า มาตรฐาน IEC 60099-5 กำหนดให้ค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานควรมีค่าไม่เกิน 600 μA เป็นต้น [9]
- อุณหภูมิหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนก็ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถพิจารณาจากองค์ประกอบความถี่ของกระแสรั่วไหล โดยองค์ประกอบความถี่

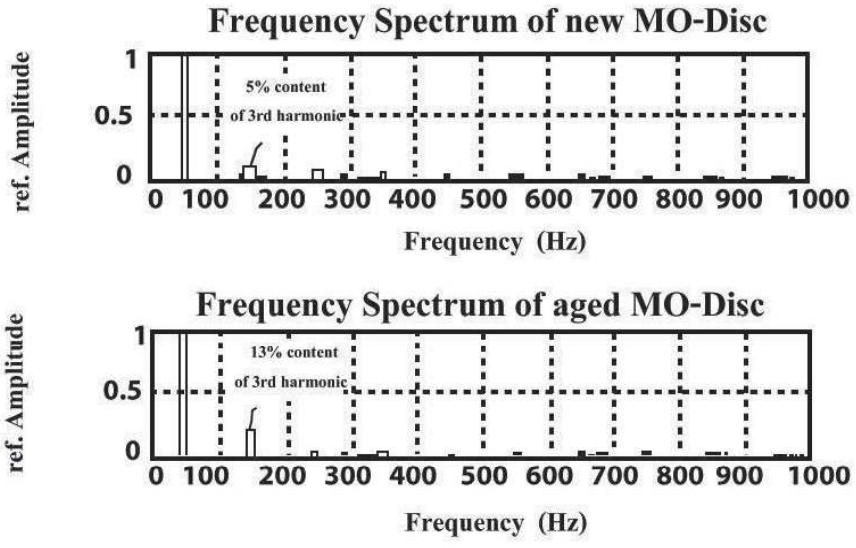
ของกระแสรั่วไหลที่นำมาพิจารณาส่วนใหญ่ คือองค์ประกอบความถี่ที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 6 ซึ่งค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานองค์ประกอบความถี่ที่ 3 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลกับอุณหภูมิของวัสดุฉนวน แสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของฉนวนเพิ่มสูงขึ้นค่ากระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานองค์ประกอบความถี่ที่ 3 มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานที่องค์ประกอบความถี่อื่น



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลเนื่องจากอุณหภูมิ [6]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลบนฉนวนพอรช์เลนและความชื้น [10]



รูปที่ 9 กระแสรั่วไหลองค์ประกอบความถี่ที่ 3 ของกับดักฟ้าผ่าใหม่และกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการใช้งาน [11]

นอกจากนี้ จากผลการศึกษาในกรณีกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการใช้งาน พบว่ากระแสรั่วไหลองค์ประกอบความถี่ที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ากระแสรั่วไหลองค์ประกอบความถี่ที่ 3 ของกับดักฟ้าผ่าที่ผ่านการใช้งานเพิ่มจาก 5% เป็น 13% ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความเสื่อมสภาพของกับดักฟ้าผ่าสามารถพิจารณาได้จากองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3 ของกระแสรั่วไหล

จากความสัมพันธ์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าขนาดและองค์ประกอบของกระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยหลายปัจจัย ทั้งสิ่งเปรอะเปื้อน ฝุ่นละออง ความชื้น อุณหภูมิ หรืออายุการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้น หากสามารถตรวจวัด แยกองค์ประกอบและวิเคราะห์กระแสรั่วไหลเชิงความต้านทานได้อย่างต่อเนื่อง (On-line monitored) ในขณะที่อุปกรณ์ยังติดตั้งและทำงานอยู่ในระบบไฟฟ้า จะทำให้เกิดความสะดวกต่อผู้ใช้และผู้ดูแลระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึก และวิเคราะห์ ไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนซ่อมบำรุงรักษา เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Muhammad A, Salman A, Muhammad A. Monitoring of Leakage Current for Composite Insulators and Electrical Devices, Advanced Materials Science Russian Academy of Advanced Materials Science Russia 2009; 21.

[2] Shirakawa S, Endo, F, Kitajima H, Kobayashi, S, Kurita K, Goto K, Sakai M. Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector, IEEE Transactions on Power Delivery 1988; 3(3).

[3] Christodoulou CA, Avgerinos MV, Ekonomou, L, Gonos I.F, Stathopulos I.A. Measurement of the Resistive Leakage Current in Surge Arresters under Artificial Rain Test and Impulse Voltage Subjection, IET Science, Measurement and Technology, 2009; 3(3)256–62.

[4] Oliveira SC, Fontana, E, Cavalcanti FJM, Real Time Monitoring of the Leakage Current of 230 kV Insulator Strings under Washing, IEEE/PES T&D Conference and Exposition 2008.

[5] Samruay S, High Voltage Engineering, 2nd, 2004 (In Thai).

[6] Xianglian Y, Yuanfang W, Xiaoyu Y. Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOV Surge Arresters, Asia Pacific. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002; 2: 683-7.

[7] Abdul-Malek Z, Novizon, Aulia. A New Method to Extract the Resistive Component of the Metal Oxide Surge Arrester Leakage Current , IEEE 2nd International Power and Energy Conference 2008.

[8] Abdul-Malek Z, Novizon, Aulia. Portable Device to Extract Resistive Component of the Metal xide Surge Arrester Leakage Current, Australasian Universities Power Engineering Conference 2008.

[9] IEC Standard No. 60099-5, Surge Arresters – Part 5: Selection and Application Recommendations.

[10] Hiroya H, Toshiyuki, K, Ryuichi I, Takeshi T. Comparison of Leakage Current Properties between Polymeric Insulators and Porcelain Insulators under Salt Polluted Conditions, International Symposium on Electrical Insulating Materials 2005.

[11] Klein T, Kohler W, Few K, Schmidt, W, Bebensee R. A New Monitoring System for Metal Oxide Surge Arresters High Voltage Engineering Symposium 1999.

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ใน วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชื่อบทความภาษาไทย Angsana New (ขนาด 18 จุด ตัวเข้ม) ชื่อบทความภาษาอังกฤษ Angsana New(ขนาด 16 จุด ตัวเข้ม

มาลี สันติคุณาภรณ์[1)] และ พินัย ทองสวัสดิ์วงศ์*[3)] (ขนาด 14 จุด)

Malee Santikunaporn[1)] and Pinai Thongsawatwong[2)]

[1)]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121 (ขนาด 12 จุด)

[2)]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

ตัวอย่างการจัดพิมพ์เอกสารต้นฉบับสำหรับตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ควรปฏิบัติตามคำแนะนำอย่างเคร่งครัด บทคัดย่อควรมีเพียงย่อหน้าเดียวที่อธิบายถึง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และสรุป ไม่ควรเกิน 300 คำ คำหลักที่เป็นภาษาอังกฤษให้ตัวอักษรคำแรกเป็นตัว พิมพ์ใหญ่ คำในลำดับถัดไปเป็นตัวพิมพ์เล็ก

คำสำคัญ: จำนวน 4 ถึง 6 คำ ภาษาไทยแต่ละคำเว้นวรรค 1 จุด ไม่ต้องมีจุลภาค (,)

Abstract

This is an instruction for manuscript preparation a publication in Thammasat Engineering Journal. Please follow this guideline strictly. The abstract should contain a single paragraph describing objectives, methodology and a summary of important results and its length should not exceed 300 words.

Keywords: 4-6 keywords, separated by colons.

1. บทนำ

บทความนี้แสดงตัวอย่างแนวทางการเตรียมต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และโปรดปฏิบัติตามหลักเกณฑ์อย่างเคร่งครัด จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ความยาวของต้นฉบับจะต้องไม่เกิน 10 หน้า มีจำนวนคำไม่เกิน 10,000 คำ

1.1 ขนาดกระดาษและระยะขอบ

กรุณาใช้กระดาษขนาด A4 ปรับเค้าโครงขนาดกระดาษ ความกว้าง 7.5 นิ้ว ความสูง 10.5 นิ้ว และรูปแบบหน้าเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่าง 0.19 นิ้ว กรอบของบทความกำหนดดังนี้ ขอบด้านบน 0.88 นิ้ว ขอบด้านล่าง 0.75 นิ้ว ด้านซ้าย 1 นิ้วและด้านขวา 0.75 นิ้ว ให้เว้น 1 บรรทัดระหว่างหัวเรื่องทุกครั้ง ให้เป็นไปตามรูปแบบของวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ สามารถโหลดรูปแบบได้ที่
http://www.engr.tu.ac.th/enjournal/

1.2 ชนิดตัวอักษร

ในบทความฉบับภาษาไทยและภาษาอังกฤษจะต้องใช้ตัวอักษร Angsana New ทั้งหมด ชื่อบทความใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด ตัวหนา ผู้แต่งใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด สถาบันและข้อมูลติดต่อใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด หัวเรื่องและหัวเรื่องย่อยใช้อักษรธรรมดาขนาด 14 จุด การบรรยายและเนื้อหาใช้ตัวธรรมดาขนาด 14 จุด คำในวงเล็บที่เป็นภาษาอังกฤษให้เป็นตัวเล็กทั้งหมด

1.3 สำหรับการลำดับหัวข้อย่อย

ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 จุด ใช้ตัวเอียง ให้ชิดทางกรอบซ้าย แต่ละหัวข้อย่อยจะเว้น 1 บรรทัด (ปรับให้บรรทัดมีขนาดเท่ากับอักษรขนาด 8 จุด) ส่วนหัวข้อย่อยให้เขียนตามตัวอย่าง ดังรายการต่อไปนี้

1. รายการแรกในรายการนี้
2. รายการที่สอง
   2.1 รายการย่อย
3. รายการสุดท้าย

1.4 โครงสร้างบทความ

เนื้อเรื่องของบทความต้องประกอบด้วยหัวข้อตามลำดับดังนี้

1. บทนำ
2. วิธีการการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง

2. ชื่อบทความ

ชื่อบทความให้เริ่มต้นบทความที่บรรทัดแรก โดยใช้ตัวอักษรขนาด 16 จุด และเป็นตัวหนา จัดชื่อบทความชิดทางกรอบซ้าย

3. ชื่อผู้แต่งและสถานที่ติดต่อ

ชื่อผู้แต่งให้พิมพ์ใต้ชื่อบทความ จัดชื่อผู้แต่งให้อยู่ชิดทางกรอบซ้าย ใช้ตัวอักษรธรรมดาขนาด 14 จุด ในกรณีมีผู้ทำวิจัยหลายท่านจากหน่วยงานต่างกันให้กำกับตัวยก [1), 2)] ไว้หลังชื่อ สำหรับ Corresponding ให้ใส่เครื่องหมาย *กำกับไว้ท้ายชื่อ สถานที่ติดต่อ ให้พิมพ์ที่อยู่หน่วยงาน รหัสไปรษณีย์ ประเทศ พิมพ์ใต้ชื่อผู้แต่งใช้ตัวธรรมดาขนาด 12 จุด จัดชิดทางกรอบซ้าย

4. บทคัดย่อ

บทความภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้เว้น 1 บรรทัดจากสถานที่ติดต่อ พิมพ์บทคัดย่อใต้หัวข้อ “บทคัดย่อ/Abstract” เนื้อความของบทคัดย่อไม่ควรเกิน 15 บรรทัด หรือ 300 คำ ส่วนบทความภาษาอังกฤษไม่ต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย

5. คำสำคัญ

บทความแต่ละเรื่องควรจะมีคำสำคัญ 4-6 คำ เพื่อระบุหัวข้อสำคัญที่กล่าวถึงในบทความ ควรใส่คำสำคัญต่อจากบทคัดย่อโดยไม่ต้องเว้นบรรทัด

6. เนื้อความ

เมื่อขึ้นย่อหน้าใหม่ ไม่ต้องเว้นบรรทัดเมื่อจะเริ่มต้นพิมพ์ย่อหน้าใหม่ ให้พิมพ์บทความบนด้านเดียวของกระดาษ A4

7. ผลการวิจัย

เสนอผลการวิจัยอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมี รูปภาพ หรือตารางประกอบ ซึ่งเมื่อมีรูปหรือตารางประกอบต้องระบุเชื่อมโยงในเนื้อหาบทความ การอธิบายไม่ซ้ำซ้อนกัน สำหรับการระบุหน่วยต่างๆ ใช้ภาษาไทยและใช้การอธิบายเปอร์เซ็นต์ด้วยคำว่า ร้อยละ ในกรณีที่กำหนดหน่วยเป็นภาษาอังกฤษให้ระบุแบบเดียวกันทั้งหมด

7.1 การลำดับตัวเลข

การลำดับตัวเลขเพื่ออ้างถึง รูปภาพ ตารางและสมการจะต้องเป็นเลขอารบิค ทุกสมการจะต้องมีวงเล็บวางไว้ชิดขอบขวา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\bar{\lambda}_g = \frac{\mu}{p}\left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \qquad (1)$$

ตัวอักษรในสมการให้ใช้ Times new Roman ขนาด 10 ตัวสัญลักษณ์ให้ใช้ Symbol ขนาด 10 ใช้ MathType หรือ Equation Editor ในการเขียนสมการ

7.2 รูปภาพและตาราง

รูปภาพและตารางจะต้องมีความกว้างเพียงพอที่จะลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือในกรณีจำเป็น เพื่อการรักษารายละเอียดในภาพอาจยอมให้กว้างเต็มหน้ากระดาษ ผู้แต่งจะต้องรับผิดชอบในการจัดภาพให้อยู่ในขนาดที่กำหนดนี้ โดยสามารถมองเห็นรายละเอียดและอ่านตัวหนังสือในภาพได้ชัดเจนโดยตัวอักษรที่ใช้อธิบายรูปจะต้องไม่ต่ำกว่าขนาด 10 รูปภาพลายเส้นจะต้องใช้เส้นหมึกสีดำวาดด้วยโปรแกรมเช่น Visio, Adobe Illustrator, Macromedia Freehand หรือโปรแกรมวาดรูปอื่นๆ ส่วนภาพถ่ายควรเป็นภาพที่มีความคมชัด

รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็น รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายภาพกำกับใต้ภาพ โดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก รูปที่ 1, รูปที่ 2 , ... พิมพ์หมายเลขและชื่อรูปไว้ใต้รูปภาพ จะต้องกำหนดให้อยู่ตรงกลางเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัด หลังคำบรรยายรูป รูปภาพทุกรูป และตารางทุกตารางที่ปรากฏในบทความจะต้องมีการอ้างอิงในเนื้อหา

ในกรณีที่เป็นตารางจะต้องมีคำบรรยายกำกับตารางไว้เหนือตารางโดยให้เรียงตามลำดับที่ปรากฏ จาก 1, 2, 3,... ตารางจะต้องกำหนดให้ชิดขอบซ้ายของเอกสาร ให้เว้นช่องว่าง 1 บรรทัดก่อนคำบรรยายตารางและหลังตาราง ตามตัวอย่างตารางดังนี้

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 1

Redox moiety	**Diluent**	**Method**	**k0 (s^{-1})**
R1	D1	ILIT	3.4×10^4
		CV	3.3×10^4
R2	D2	ILIT	6.0×10^4

ตัวอย่างการเขียนตารางที่ 2

x	a_r / m_r	$2\zeta_r\omega_r$
0.1	2.7470e+01	2.7483e+01
0.5	3.5352e+01	3.5360e+01

8. การอภิปรายผล

การอภิปรายผลวิจัยเพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น เพื่อเสนอลู่ทางที่จะใช้ประโยชน์ หาข้อยุติในการวิจัยบางอย่าง ฯลฯ ผลการวิจัยและการอภิปรายผลอาจนำมาเขียนไว้ในตอนเดียวกัน

9. สรุป

สรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป โดยบทความของท่านควรได้รับการตรวจสอบจากผู้ร่วมเขียนทุกท่านก่อนทำการส่งบทความ

10. กิตติกรรมประกาศ

การแสดงความขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนสรุปประเด็นและสาระสำคัญของงานวิจัย ไม่ควรมีความยาวมากเกินไป

11. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงใช้ระบบแวนคูเวอร์ (vancuvour style) ในกรณีที่เป็นภาษาไทย ให้เขียนเป็นภาษาอังกฤษด้วย และต่อท้ายด้วย (In Thai) ส่วนชื่อผู้แต่งให้ใช้นามสกุลขึ้นก่อนแล้วตามด้วยอักษรย่อของชื่อนั้น

11.1 การอ้างอิงในเนื้อหา

แบบการอ้างอิงเอกสารในเนื้อหาของบทความใช้ระบบตัวเลข ให้เรียงลำดับเลขตามลำดับของเอกสารที่มีการอ้างถึงในเนื้อหาและหมายเลขที่อ้างถึงในเนื้อเรื่องนั้นจะต้องตรงกับหมายเลขที่มีการกำกับไว้ในส่วนเอกสารอ้างอิงด้วย ให้ใช้ตัวเลขอารบิคในวงเล็บต่อท้ายข้อความที่นำมาอ้างอิงในบทความ เช่น (1) หรือ (2-4, 8, 10) หมายถึงอ้างถึงลำดับผู้แต่งที่ 1 หรือ ลำดับที่ 2, 3, 4, 8, 10 โดยเรียงลำดับจากหมายเลข 1, 2, 3,... ไปจนถึงเลขที่สุดท้าย ตามการอ้างอิงการเขียนเอกสารอ้างอิง

11.2 ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงท้ายเรื่อง

เขียนอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ และใส่อ้างอิงในท้ายเรื่องเฉพาะที่มีปรากฏในเนื้อหาบทความหรือบทความวิจัยเท่านั้น

1. การเขียนอ้างอิงจากหนังสือ

(1) Murray PR, Rosenthal KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2002.

2. การเขียนอ้างอิงจากวารสาร

(2) Bua-art S, Saksirirat W, Kanokmedhakul S, Hiransalee A, Lekphrom R. Extraction of bioactive compounds from luminescent mushroom (Neonothopanus nambi) and its effect on root-knot nema-tode (Meloidogyne incognita). KKU Res J. 2010;15(1): 726-37. (In Thai).

3. การเขียนอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์

(3) Srisuk M. Cloning and characterization of gene insulin [MSc thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2002. (In Thai).

4. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากการประชุมวิชาการ

(4) Bengtsson S, Solheim BG. Enforcement of data protection, privacy and security in medicalin-formatics. In: Lun KC, Degoulet P, Piemme TE, Rienhoff O, editors. MEDINFO 92. Proceedings of the 7th World Congress on Medical Informatics; 1992 Sep 6-10; Geneva, Switzerland. Amsterdam: North-Holland; 1992. p. 1561-5.

5. การเขียนอ้างอิงจากบทความจากสิทธิบัตร

(5) Pagedas AC, inventor; Ancel Surgical R&D Inc., assignee. Flexible endoscopic grasping and cutting device and positioning tool assembly. United States patent US 20020103498. 2002 Aug 1.

6. บทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์

(6) Morse SS. Factors in the emergence of infectious diseases. Emerg Infect Dis [serial online] 1995 Jan-Mar [cited 1996 Jun 5];1(1):[24 screens]. Available from: URL: http://www.cdc.gov/ncidod/EID/eid.htm.

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์กับวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ขอส่งบทความ ❑ บทความวิจัย สาขา..... ❑ บทความวิชาการ สาขา.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) .....

.....

(ภาษาอังกฤษ) .....

.....

ชื่อ-นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย)	**ชื่อ-นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ)**
1.....	1.....
2.....	2.....
3.....	3.....
4.....	4.....
5.....	5.....
6.....	6.....

ชื่อ-และที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้สะดวก

.....

.....

.....จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

โทรศัพท์มือถือ.....โทรสาร.....

E-mail: .....

แนะนำผู้อ่านบทความ.....

.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ [ ] เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

[ ] เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามรายชื่อที่ระบุ ในบทความจริง

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความดังกล่าวลงตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่น ทั้งนี้ หากข้าพเจ้าขอถอนบทความและไม่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ หรือเพิกเฉยไม่ส่งบทความฉบับแก้ไขเพื่อลงตีพิมพ์ข้าพเจ้าจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าตอบแทนผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความทั้งหมด

ลงนาม.....

(.....)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ
วิศวกรรมสารธรรมศาสตร์ ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2558)

1. ผศ.ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด	สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
2. รศ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รศ.ดร.ตระกูล อร่ามรักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. อ.ดร.โศภิดา สังข์สุนทร	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
5. รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6. ผศ.ดร.ศุภกิตติ์ โชติโก	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. รศ.ดร.วีรยา ฉิมอ้อย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
8. ผศ.ดร.รัตมณี นันทสาร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
9. ดร.สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ	สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10. ดร.ธัชชัย ปุษยะนาวิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

พิมพ์ที่: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, พ.ศ. 2559
โทรศัพท์ 0-2564-3104 ถึง 6
โทรสาร 0-2564-3119
http://www.thammasatprintinghouse.com