

# แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสัน (Josephson Voltage Standard, JVS)

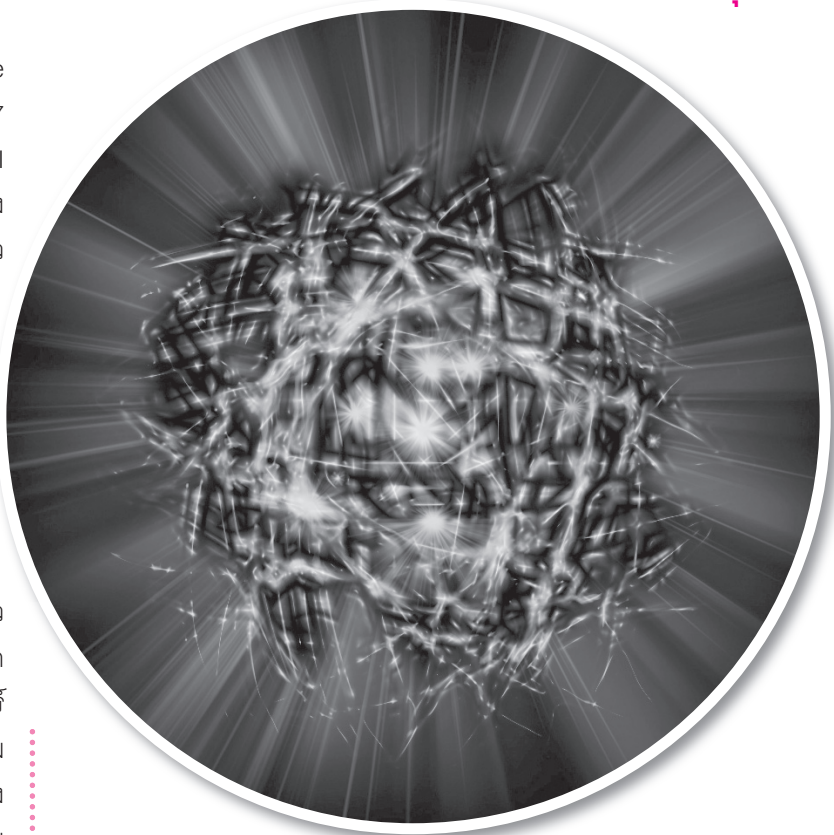
สิทธิศักดิ์ พิมพสุภักดิ์\*

>>> **แอมแปร์** (Ampere, A) เป็นหน่วยพื้นฐาน (base unit) ในการวัดทางไฟฟ้าเพียงหน่วยเดียวจากจำนวน 7 หน่วย ของระบบสากล (International System of Units, SI Units) “กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ หมายถึง ปริมาณของ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ไหลในลวดตัวนำ 2 เส้น ที่มีความยาว อนันต์ เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยมากๆ จนไม่จำเป็นต้องคำนึง ถึงและวางคู่ขนานห่างกัน 1 เมตรในสุญญากาศแล้ว ทำให้เกิดแรงที่มีขนาด  $2 \times 10^{-7}$  นิวตันต่อเมตร ( $N/m$ )”

โวลต์ (Volt, V) ไม่ใช่หน่วยพื้นฐานในระบบ SI Units คำจำกัดความของหน่วยโวลต์จะอ้างอิงถึงกำลัง ทางไฟฟ้า (electrical power) ซึ่งได้จากกระแสไฟฟ้าคูณ กับแรงดันไฟฟ้า ( $I \cdot V$ ) และกำลังทางกล (mechanical power) ซึ่งได้จากแรงคูณกับระยะทางต่อเวลา ( $F \cdot L/t$ ) กล่าว คือ “แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ หมายถึง แรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด บนลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 1 แอมแปร์ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า 1 วัตต์” จะเห็นว่าการเชื่อมโยงแอมแปร์และโวลต์ไปสู่หน่วยเชิงกลของระยะทาง แรงแรง และกำลัง ก่อให้เกิดหน่วยโวลต์ขึ้น ดังรูปที่ 1 การสร้างหน่วย โวลต์จากนิยามของ SI นั้นเป็นเรื่องยาก ใช้เวลานานและ สภาวะที่สร้างได้มีเสถียรภาพต่ำ

ก่อนปี ค.ศ. 1972 Weston Cell เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของหน่วยโวลต์ แต่ยังมีคุณสมบัติ ที่ไม่ดีพอที่จะเป็นมาตรฐานอ้างอิงของแรงดันไฟฟ้าได้ ทั้งใน ความเสถียร (stability) ความถูกต้อง (accuracy) การ เปลี่ยนค่า (drift) ความไวต่อการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อน ย้าย ตลอดจนค่าความต้านทานภายในที่อาจทำให้เกิด ปัญหาต่อเครื่องมือวัดที่นำมาทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่า ต่างๆ เหล่านี้ได้ถูกพัฒนาให้ดีขึ้นหลังจากที่ไบรอัน โจเซฟสัน (Brian D. Josephson) ได้ค้นพบปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Joesphson effect) ในปี ค.ศ.1962

\* นักมาตรวิทยา ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า  
(จากหนังสือ METROLOGY INFO, Vol.10, No.42  
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)



## ปรากฏการณ์โจเซฟสัน

ปรากฏการณ์โจเซฟสันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่าง สารตัวนำยิ่งยวด (Superconductors) ที่กันด้วยฉนวนบางๆ ซึ่งเราเรียกรอย ต่อนี้ว่า รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Junction) ในขณะที่ไม่มีการจ่ายแรง ดันไฟฟ้า ( $V = 0$ ) จะมีไฟฟ้ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านรอยต่อ ซึ่งเป็นการ ไหลแบบทะลุทะลวง (tunnelling) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โจเซฟ สันกระแสตรง (DC Josephson effect) สมการของโจเซฟสันสำหรับกระแส ไฟฟ้ายิ่งยวดที่ไหลทะลุผ่านรอยต่อของตัวนำยิ่งยวดนี้ มีค่าเป็น

$$(1) \quad I = I_c \sin \left[ \frac{4 \pi e}{h} \int V dt \right]$$

เมื่อ

$I$  = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อ (junction current)

$I_c$  = กระแสไฟฟ้าวิกฤตของรอยต่อ (critical current)

$V$  = แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ

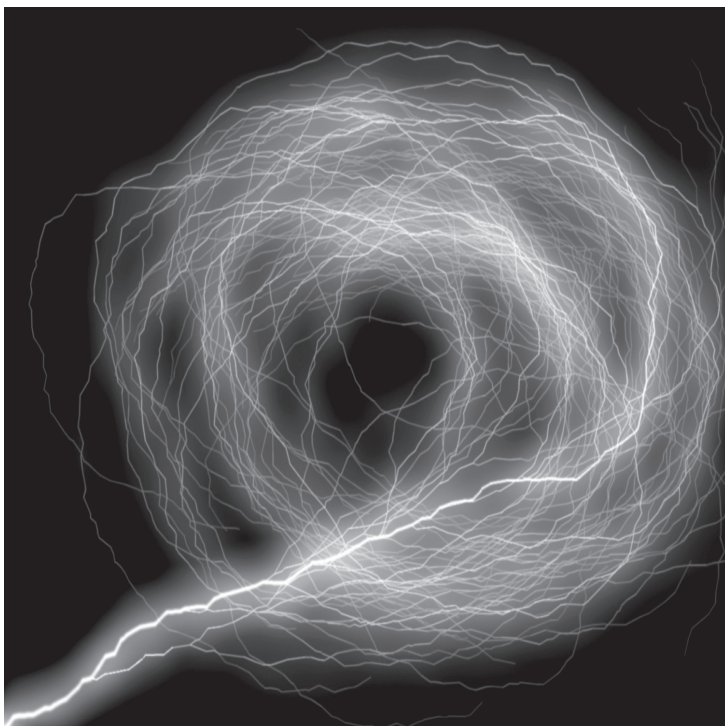
$e/h$  = อัตราส่วนระหว่างค่าประจุของอิเล็กตรอน (electronic charge,  $e$ )

และค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant,  $h$ )

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าหนึ่งให้กับรอยต่อโจเซฟสัน จากสมการ (1) จะได้ว่า  $I = I_c \sin \left[ \frac{4\pi e V t}{h} \right]$  นั่นคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจะผันด้วยค่าหนึ่ง ซึ่งแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage) ที่จ่ายให้กับรอยต่อ มีค่า  $f = 2eV/h$  ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์โจเซฟสันกระแสสลับ (AC Josephson effect) อัตราส่วนของความถี่ต่อแรงดันไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับ  $2eV/h$  มีค่าประมาณ 484 GHz/mV ด้วยความถี่ที่สูงและขนาดของการสั่นที่เล็กนี้ทำให้การวัดโดยตรงนั้นเป็นไปได้ยากลำบาก อย่างไรก็ตาม ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้วยความถี่  $f$  ให้กับรอยต่อโจเซฟสันแล้ว จะพบว่าเกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ยตกคร่อมรอยต่อที่มีค่าเท่ากับ  $hf/2e$  ปรากฏการณ์นี้จะปรากฏให้เห็นในรูปของสแต็ปแบบขั้นบันไดขนาดคงที่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (constant voltage steps) ซึ่งมีค่าเป็น

$$(2) \quad V = n \frac{h}{2e} f \quad \text{เมื่อ } n = \text{จำนวนนับ}$$

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นี้มีความถูกต้องสูงมาก ลักษณะเช่นนี้เองที่นักวิทยาศาสตร์ได้นำมาพัฒนาเป็นตัวแทนระดับปฐมภูมิของหน่วยโวลต์ (primary representation of the volt) ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสันจะไม่เป็นไปตามคำจำกัดความของหน่วยโวลต์ก็ตาม แต่สามารถ



ให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่และมีความถูกต้องสูงไม่ว่าจะทำการวัดที่ใด ๆ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าค่าความถูกต้องขึ้นอยู่กับความสามารถในการวัดเท่านั้น

ในช่วงแรกๆ นั้นปรากฏการณ์โจเซฟสันจะใช้ควบคู่กับ Weston Cell เพื่อใช้สำหรับหาค่าคงที่ของ  $2e/h$  โดยที่ค่าความไม่แน่นอนของการวัดนั้นถูกจำกัดด้วยความไม่แน่นอนของการทำให้เป็นจริงของหน่วยโวลต์ (SI volt realization) และเสถียรภาพของ Weston Cell ในขณะที่เสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานโจเซฟสันขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของความถี่ ซึ่งสามารถทำให้เสถียรภาพอยู่ในระดับ  $10^{12}$  ได้โดยง่าย อัตราส่วนดังกล่าวจึงยังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างที่ห้องปฏิบัติการของแต่ละประเทศนำไปใช้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1988 ที่ประชุมคณะกรรมการมาตรวิทยาระหว่างประเทศ (International Committee for Weights and Measure, CIPM) ได้ให้ชื่ออัตราส่วนดังกล่าวว่า ค่าคงที่โจเซฟสัน (Josephson constant,  $K_J$ ) และกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 483597.9 GHz/V ตั้งแต่ มกราคม 1990 เป็นต้นไป เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $K_{J-90}$  สมการที่ (2) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$(3) \quad V = \frac{nf}{K_{J-90}}$$

อ่านต่อบนหน้า