

## การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์

### The Development of a Temperature Control System for Scanning Tunneling Microscope

พงษ์พันธุ์ ฤกษ์ชุมทรัพย์ และ เพ็ญลภัส ยิ้มเสมอจิต

Pongpun Rerkkumsup<sup>1</sup> and Penlapas Yimsamerjit<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, <sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. 0-2219-3833 ต่อ 244 โทรสาร 0-2219-3855

E-mail: pongpun@ptwit.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ ด้วยการทำงานร่วมกันของแคปซูลผิวปิดทรงกลมสำหรับแยกอุณหภูมิล้อมรอบกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ออกจากอุณหภูมิภายในห้องทดลองที่มีเสถียรภาพต่ำ และระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อน ทำให้การควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์มีเสถียรภาพในระดับน่าพอใจ ผลการควบคุมอุณหภูมิของตัวพาความร้อนและกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับขดท่อทองแดงในแคปซูลผิวปิดแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิดตอบสนองได้รวดเร็วด้วยกำหนดเวลา 12 นาที ระบบสามารถควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิดในระดับ 200 m°C ต่อเนื่องนานกว่า 5 ชั่วโมง เสถียรภาพของอุณหภูมิในระดับ 50 m°C ควบคุมได้ตลอดระยะเวลา 40 นาที

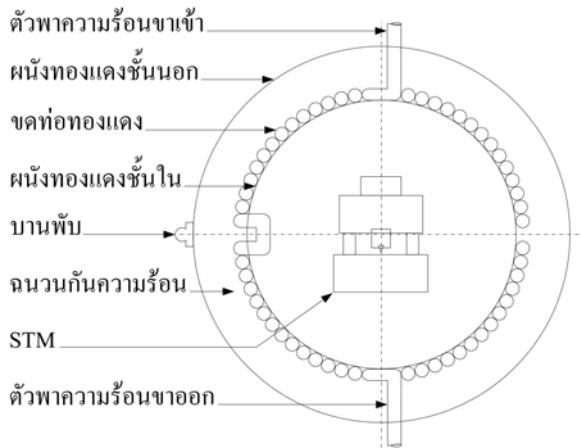
#### Abstract

This research article describes the design and development of a temperature control system used for a scanning tunneling microscope (STM). By combining the spherical closed surface capsule, for isolating the ambient temperature of an STM from the low temperature stability in experimental room, and the temperature control system for heat convector, the control of ambient temperature for an STM yields the verified stability level. The results of temperature control of heat convector and process for heat exchanging with the spiral copper pipe in the closed

surface capsule illustrate that temperature inside the capsule has fast response with delay time of 12 min. The system can control the temperature stability in the closed surface capsule with the level of 200 m°C for over 5 hours, continuously. The temperature stability with the level of 50 m°C is achieved for a period of 40 min.

#### 1. บทนำ

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ (Scanning tunneling microscope, STM) [1] เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการทดลองด้านวิศวกรรมพื้นผิว (Surface engineering) และวิศวกรรมเที่ยงตรงขั้นสูง (Ultra precision engineering) และมีความเป็นไปได้สูงที่จะประยุกต์ใช้ในงานวัดละเอียดระดับนาโนเมตร (Nanometrology) [2] ด้วยข้อดีที่มีโครงสร้างเรียบง่ายต่อการสร้างชิ้นใช้งานและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น สะดวกต่อการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง (Sample) และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมชั้นบรรยากาศได้ [3] อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อมโดยเฉพะอุณหภูมิและแรงสั่นสะเทือนขณะบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างด้วย STM ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของภาพพื้นผิวตัวอย่าง [4-6] การแกว่งไปมาของอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature fluctuation) ขณะบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างเพียงเล็กน้อยก่อให้เกิดการบิดเบือนของพื้นผิวตัวอย่างอย่างมาก จนอาจทำให้ไม่สามารถแยกแยะอะตอมบนภาพตัวอย่างที่บันทึกได้ เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว จึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีศักยภาพสูง [7-8] แต่มีโครงสร้างซับซ้อนและใช้งบประมาณในการดำเนินการสูงเกินกว่าห้องทดลองระดับท้องถิ่นจะดำเนินการได้ วิธีควบคุม



รูปที่ 1 แคลซูลผิวปิดทรงกลม

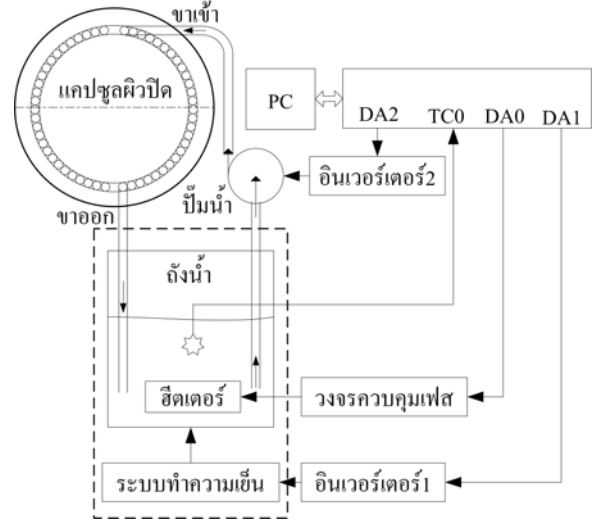
เสถียรภาพของอุณหภูมิโดยการทำงานร่วมกันของเซลล์ทรงกระบอกกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเชิงพาณิชย์มีราคาถูกกว่ามากและมีศักยภาพในระดับน่าพอใจ [9] แต่ขาดซึ่งองค์ความรู้ในการพัฒนาต่อเนื้อเพื่อเพิ่มศักยภาพโดยรวมให้กับระบบควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิ

งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งเน้นการสร้างและพัฒนาระบบควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิแวดล้อมสำหรับ STM โดยการทำงานร่วมกันของแคลซูลผิวปิดรูปทรงกลมและระบบควบคุมอุณหภูมิตัวแลกเปลี่ยนความร้อน

2. ระบบควบคุมอุณหภูมิเสถียรภาพสูง

2.1 แคลซูลผิวปิด

เพื่อให้การเบี่ยงเบนอุณหภูมิภายในห้องทดลองเฉลี่ยได้ทั่วทิศทางและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิล้อมรอบ STM อย่างมีรูปแบบเดียวกัน คณะวิจัยจึงออกแบบแคลซูลผิวปิดทรงกลม [10] สำหรับใช้เป็นตัวแยกอุณหภูมิล้อมรอบ STM ออกจากอุณหภูมิเสถียรภาพต่ำในห้องทดลอง รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของแคลซูลผิวปิดทรงกลมที่พัฒนาขึ้น แคลซูลประกอบด้วยผนังตัวนำความร้อนทำจากแผ่นทองแดงหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น ขดท่อทองแดงสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุมเสถียรภาพอุณหภูมิภายในแคลซูลจำนวน 1 ชั้นพร้อมทางเข้าและ



รูปที่ 2 ระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อน

ทางออกของตัวพาความร้อน และฉนวนกันความร้อนจำนวน 1 ชั้น ผนังทองแดงชั้นในออกแบบให้มีปริมาตรมากพอสำหรับติดตั้ง STM และระบบทดลองอื่นในอนาคต โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ผนังทองแดงชั้นนอกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร แคลซูลผิวปิดถูกสร้างเป็นครึ่งทรงกลม 2 ส่วน เพื่อให้สะดวกในการติดตั้ง STM ที่จะสร้างขึ้นในอนาคตอันใกล้

2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อน

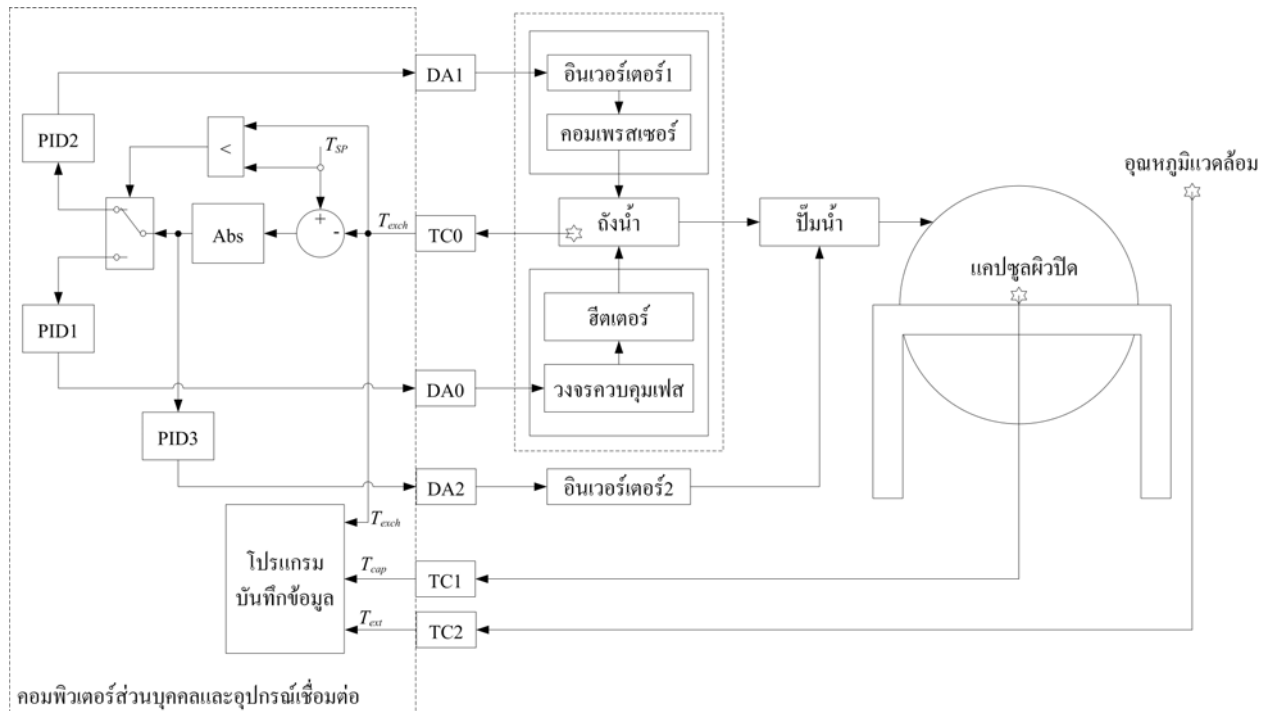
จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ภายในแคลซูลผิวปิด  $T_{cap}$

$$\frac{T_{cap}(s)}{Q(s)} = \frac{RcT_{exch}}{RCs + 1} \tag{1}$$

โดยที่  $Q(s)$  คือ อัตราการไหลขาเข้าของตัวพาความร้อน [kg/sec]

$R$  คือ ค่าความต้านทานอุณหภูมิหรือการเปลี่ยนแปลงผลต่างอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของความร้อน [ $^{\circ}C \text{ sec} / \text{kcal}$ ]

$c$  คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลขาเข้าที่ใช้เป็นพาความร้อนออกจากแคลซูล [kcal/kg $^{\circ}C$ ]



รูปที่ 3 ระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนและการควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแกปซูลหิวปิด

$T_{exch}$  คือ อุณหภูมิของของไหลขาเข้าที่ใช้เป็นตัวพาความร้อนออกจากแกปซูล [°C]

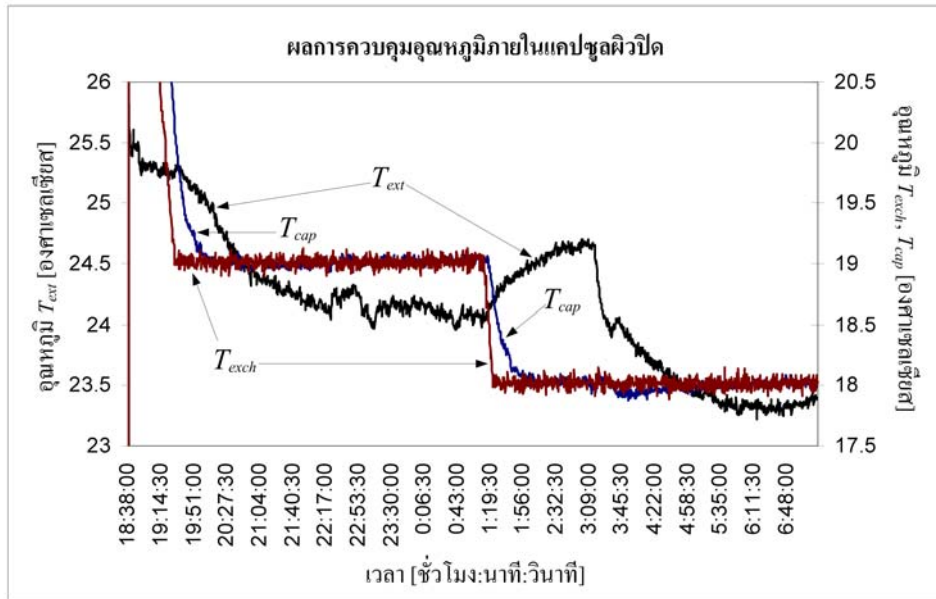
$C$  คือ ค่าความจุอุณหภูมิหรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ถูกกักเก็บต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [kcal/°C]

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิภายในแกปซูลหิวปิดด้วยการจ่ายตัวพาความร้อนเข้าสู่ชุดท่อทองแดง แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อน  $T_{exch}$  ให้มีเสถียรภาพสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ คณะวิจัยจึงออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2 ระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนเพื่อใช้แลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับชุดท่อทองแดงในแกปซูลหิวปิดประกอบด้วยระบบทำความเย็นที่ควบคุมการลดอุณหภูมิของน้ำในถังด้วยคอมเพรสเซอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์1 ฮีตเตอร์ที่ควบคุมการทำงานด้วยวงจรควบคุมเฟสเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในถังและปั้มน้ำที่ควบคุมอัตราการไหลด้วยอินเวอร์เตอร์2 เพื่อจ่ายน้ำที่ผ่านการควบคุมอุณหภูมิแล้วเข้าสู่ชุดท่อทองแดง

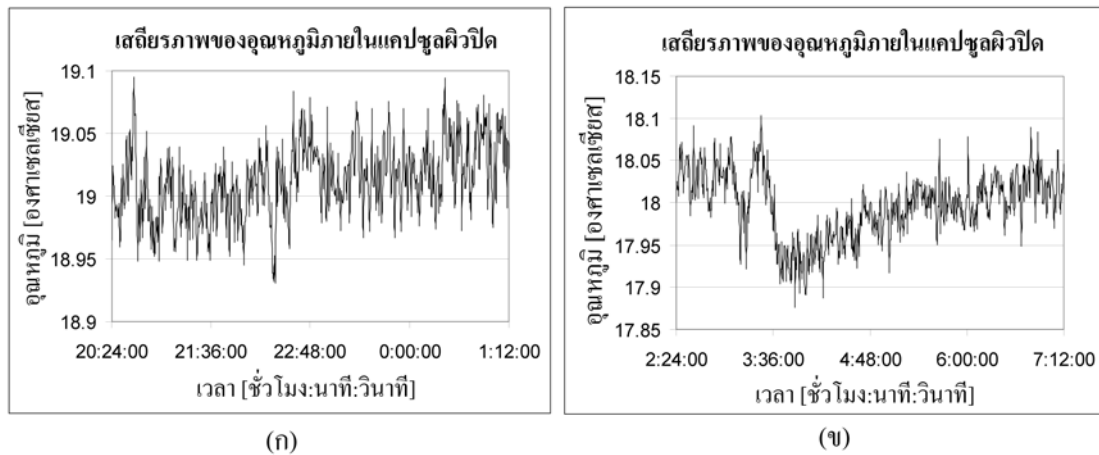
ในแกปซูลหิวปิด การควบคุมอุณหภูมิในถังด้วยระบบทำความเย็นและฮีตเตอร์จะดำเนินการควบคู่ไปกับการไหลเวียนตัวพาความร้อนออกจากแกปซูลหิวปิดโดยทำการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) และชุดเชื่อมต่อรับ-ส่งสัญญาณอนาล็อก

### 3. ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนและการควบคุมเสถียรภาพอุณหภูมิภายในแกปซูลหิวปิดที่ใช้ในการทดลอง เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดกันน้ำจะอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำในถัง  $T_{exch}$  ผ่านพอร์ต TC0 เข้ามาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp}$  ค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดระหว่าง  $T_{sp}$  และ  $T_{exch}$  ถูกส่งไปยังตัวควบคุมตัวใดตัวหนึ่ง ในกรณีที่  $T_{exch} < T_{sp}$  ตัวควบคุม PID1 จะส่งสัญญาณผ่านพอร์ต DA0 ไปยังวงจรควบคุมเฟสเพื่อสั่งให้ฮีตเตอร์เพิ่มอุณหภูมิ  $T_{exch}$  แต่ถ้า  $T_{exch} > T_{sp}$  ตัวควบคุม PID2 จะทำงาน และส่งสัญญาณผ่านพอร์ต DA1 ไปยังอินเวอร์เตอร์1 เพื่อควบคุมคอมเพรสเซอร์ในการลด



รูปที่ 4 ผลการควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนและการควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวหนัง



รูปที่ 5 เสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวหนัง เมื่อ (ก) อุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ (ข) อุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ  $T_{exch}$  ในขณะที่เดียวกันกับการควบคุมตัวพาความร้อนในถังน้ำกำลังดำเนินอยู่นี้ ป้อนน้ำจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PID3 ผ่านพอร์ต DA2 และอินเวอร์เตอร์ 2 ให้ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเพื่อจ่ายน้ำที่กำลังถูกควบคุมอุณหภูมิเข้าทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับขดท่อทองแดงในแคปซูลผิวหนัง เมื่อ  $T_{exch}$  เข้าใกล้ค่า  $T_{sp}$  มากขึ้น อัตราการไหลจะลดลงจนกระทั่งถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ตั้งไว้เพื่อให้ป้อนน้ำเลี้ยงระบบแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่

ตลอดเวลา จึงมั่นใจได้ว่าอุณหภูมิของน้ำในถังถูกอัพเดทจากภาระอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นภายในแคปซูลผิวหนังตามเวลาจริง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่ผ่านการควบคุมอุณหภูมิแล้วกับขดท่อทองแดงของแคปซูลผิวหนัง เทอร์โมคัปเปิ้ลอีก 1 ตัวจึงถูกติดตั้งไว้ภายในแคปซูล และเพื่อประเมินศักยภาพในการรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวหนัง  $T_{cap}$  เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อม  $T_{ext}$  เทอร์โมคัปเปิ้ล

อีก 1 ตัวจึงถูกติดตั้งไว้ภายนอกแคปซูล โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบทดลองและการบันทึกข้อมูลพัฒนาขึ้นโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลร่วมกับโปรแกรม LabVIEW [11] ผ่านชุดเชื่อมต่อ cDAQ-9172 และโมดูลรับ-ส่งสัญญาณอนาล็อก

รูปที่ 4 แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิภายในถังน้ำ  $T_{exch}$  และผลการควบคุมเสถียรภาพอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิด  $T_{cap}$  การทดลองเริ่มต้นที่อุณหภูมิแวดล้อมแคปซูลผิวปิด  $T_{ext}$  มีค่าประมาณ  $25.5^{\circ}\text{C}$  ผลการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถัง  $T_{exch}$  ด้วยค่าอุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp}$  ที่  $19^{\circ}\text{C}$  แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิ  $T_{exch}$  ซึ่งใช้เป็นตัวพาความร้อนออกจากชุดท่อทองแดงของแคปซูลผิวปิด และค่าอุณหภูมิภายในแคปซูล  $T_{cap}$  เข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่ต้องการอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการลดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp}$  เป็น  $18^{\circ}\text{C}$  ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้ง  $T_{exch}$  และ  $T_{cap}$  ลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิที่ต้องการใหม่อย่างรวดเร็วด้วยค่าหน่วงเวลา (Delay time) 12 นาที โดยประมาณ รูปที่ 5 แสดงเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิด  $T_{cap}$  เมื่อ (ก) อุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp}$  คือ  $19^{\circ}\text{C}$  และ (ข) อุณหภูมิที่ต้องการ  $T_{sp}$  คือ  $18^{\circ}\text{C}$  ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิดในระดับ  $200\text{ m}^{\circ}\text{C}$  ต่อเนื่องได้นานกว่า 5 ชั่วโมง และบางส่วนของผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลผิวปิดในระดับ  $50\text{ m}^{\circ}\text{C}$  ต่อเนื่องได้นาน 40 นาที

#### 4. สรุปผล

ระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์ถูกพัฒนาขึ้นโดยประกอบด้วยแคปซูลผิวปิดทรงกลมทำหน้าที่แยกระบบทดลองออกจากสภาพแวดล้อมที่มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิค่า ระบบควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกับแคปซูลผิวปิด และระบบจ่ายตัวพาความร้อนเข้าสู่แคปซูลผิวปิด ด้วยการทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิระหว่างฮีตเตอร์และคอมเพรสเซอร์ทำให้การควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อน

ตอบสนองรวดเร็ว ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิตัวพาความร้อนและดำเนินการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะในระดับน่าพอใจ กล่าวคือ การควบคุมอุณหภูมิเมื่อปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ต้องการตอบสนองได้รวดเร็ว และมีเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในแคปซูลในระดับ  $200\text{ m}^{\circ}\text{C}$  และ  $50\text{ m}^{\circ}\text{C}$  ต่อเนื่องนานกว่า 5 ชั่วโมง และ 40 นาที ตามลำดับ คณะวิจัยเชื่อว่าหากทำการควบคุมอุณหภูมิภายในในห้องทดลองให้มีเสถียรภาพมากขึ้นกว่าเดิม ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถพัฒนาประสิทธิภาพการรักษาเสถียรภาพทางอุณหภูมิในระดับ  $10\text{ m}^{\circ}\text{C}$  ต่อเนื่องนานกว่า 1 ชั่วโมงเพื่อการบันทึกภาพพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดในอุโมงค์อย่างมีประสิทธิภาพได้

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ จรัสศรี เสือทับทิม, สุรศักดิ์ สี่เฉย ปรีชา เพชรไชย และ โสภณ เจริญลาภ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำหรับความอดสาหะในการสร้างอุปกรณ์ทดลอง และขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยผ่านทุนพัฒนาศักยภาพในการทำวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Binnig and H. Rohrer, "Scanning Tunneling Microscope" IBM J. RES. DEVELOP., vol. 30, no. 4, 1986, pp. 355-369.
- [2] M. Aketagawa, K. Takada, P. Rerkkumsup, Y. Togawa and H. Honda, "Real-Time Atomic Encoder Using Scanning Tunneling Microscope and Regular Crystalline Surface" Mea. Sci. Techno., vol. 17, no. 3, 2006, pp. 513-518.
- [3] S. I. Park and C. F. Quate, "Tunneling Microscopy of Graphite in Air" Appl. Phys. Lett., vol. 48, no. 2, 1986,

pp. 112-114.

[4] B. S. Swartzentruber, "Direct Measurement of Surface Diffusion Using Atom-Tracking Scanning Tunneling Microscopy" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 3, 1996, pp. 459-462.

[5] M. Aketagawa, K. Takada, K. Kobayashi, N. Takeshima, M. Noro and Y. Nakayama, "Length Measurement Using a Regular Crystalline Lattice and a Dual Tunneling Unit Scanning Tunneling Microscope in a Thermo-Stabilized Cell" *Mea. Sci. Technol.*, vol. 9, 1998, pp. 1076-1081.

[6] P. Rerkkumsum, M. Aketagawa, K. Takada, Y. Togawa, N. T. Thinh and Y. Kozuma, "Highly Stable Atom-Tracking Scanning Tunneling Microscopy" *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, no. 7, 2004, pp. 1061-1067.

[7] E. C. Teague, "The national institute of standard and technology molecular measuring machine project: metrology and precision engineering design" *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 7, no. 6, 1989, pp. 1898-1902.

[8] J. A. Kramar, J. S. Jun, W. B. Penzes, F. E. Scire, E.C. Teague and J. S. Villarrubia, "Grating pitch measurements with the molecular measuring machine" *SPIE: Metrology, Characterization, and Standards for Optical Digital Data Disks*. July 1999, SPIE, vol. 3806, pp. 46-53.

[9] M. Aketagawa, K. Takada, K. Kobayashi, N. Takeshima, M. Noro and Y. Nakayama, "Length measurement using a regular crystalline lattice and a dual tunneling unit scanning tunneling microscope in a thermo-stabilized cell" *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, 1998, pp. 1076-1081.

[10] P. Rerkkumsum and P. Prachprayoon, "The Proposal of Novel Design of Temperature Control System for Scanning Tunneling Microscope: The Closed Surface Capsule" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, January 6-8, 2008, Sanya, China, pp. 432-435.

[11] LabVIEW<sup>®</sup> is a registered trademark of the National Instruments Corporation.