# การใช้สารเปลี่ยนสถานะขนาดไมโครเพื่อปรับปรุงพฤติกรรมทางความร้อนให้แก่ของเหลวระบายความร้อน

# Utilization of Micro-Encapsulated Phase-Change Material (MEPCM) for Thermal Behavior Enhancement of a Cooling Liquid

ชลธิศ เอี่ยมวรวุฒิกุล*, ฉัตรชัย เปล่งสะอาด, และ เกียรติศักดิ์ สกุลพันธุ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
61 ถ. พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-579-1111 ต่อ 1202 *อีเมล์: Chonlathis@gmail.com

Chonlathis Eiamworawutthikul*, Chatchai Plengsaard, and Kiattisak Sakulphan
Department of Mechanical Engineering, Sripatum University
61 Paholyothin Rd, Jatujak District, Bangkok 10900, Thailand
Tel 02-579-0111 ext 1202 *E-mail: Chonlathis@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยได้ศึกษาถึงการใช้ micro-encapsulated phase-change material (MEPCM) เพื่อการปรับปรุงพฤติกรรมทางความร้อนให้แก่ของเหลวระบายความร้อน อันเนื่องมา จากอิทธิพลของ การเปลี่ยนสถานะระหว่างสภาพของแข็งและของเหลว MEPCM ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-30 μm ถูกผสมเข้ากับของเหลวซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง Ethylene Glycol และ น้ำ จนมีลักษณะเป็น “slurry fluid” การทดลองถูกออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานระบบระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเลคโทรนิก โดยสารเปลี่ยนสถานะที่เลือกใช้ใน MEPCM คือ Octacosane เนื่องจากมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่ประมาณ 60°C ซึ่งเหมาะสมสำหรับอุณหภูมิควบคุมของอุปกรณ์อิเลคโทรนิคทั่วไป การทดลองดำเนินโดยการใช้ชุดทดลองวงจรการไหล (flow-loop) ซึ่งประกอบด้วย แหล่งให้ความร้อน, แหล่งระบายความร้อน, เครื่องมือวัดอัตราการไหลของมวลแบบ coriolis, ปั๊มแบบ magnetic-coupling, และ ชุดเก็บประมวลผลข้อมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ MEPCM ในของเหลวระบายความร้อนสามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนให้แก่ของเหลวได้ถึง 5 เท่าตัว และสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้มากถึง 20%

**Abstract**

Experimental study was conducted to investigate the thermal behavior enhancement of a cooling liquid when it was mixed with micro-encapsulated phase-change material (MEPCM). The improvement was found to be due to the phase changing effect of the PCM which was able to increase latent heat storage to the coolant. The MEPCM having capsule diameter of approximately 10-30 μm was mixed with a base-fluid mixture of Ethylene Glycol and water to become “slurry fluid”. The slurry fluid was then used as a coolant in the experiment designed to model a cooling system of electronic cooling applications. For this reason, Octacosane MEPCM was selected because it has melting point at about 60°C which is suitable for typical electronic controlled temperature. The experiment was conducted using a flow-loop equipped with heat source, heat sink, coriolis mass flow meter, magnetic-coupling pump, and data-acquisition system. The experimental results show that the phase-changing effect of the MEPCM used can enhance the heat capacity of the slurry working fluid by up to 5 times higher than that of the base-fluid. Additionally, heat transfer coefficient inside the heater can be increased by up to 20% over the baseline condition when slurry fluid was used.

## 1. บทนำ

สารเปลี่ยนสถานะ หรือ phase-change material (PCM) ซึ่งมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว ได้ถูกนำมาศึกษาและใช้งานเพื่อควบคุมจัดการ การถ่ายเทความร้อนในงานวิศวกรรมหลายๆ ด้าน PCMที่ได้รับการพิจารณาโดยมากมีทั้งประเภท paraffin wax, fatty acid, และ salt hydrates โดยที่ paraffin wax และ fatty acid

ได้รับการพิสูจน์ว่ามีความเสถียรในการดูดซับและคายความร้อนที่ดีกว่าสารประเภท salt hydrates [4]

ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางถึง การผนวกสารเปลี่ยนสถานะประเภทต่างๆ เข้าเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอาคาร เพื่อจุดประสงค์ในการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ และการจัดการภาระความร้อนภายในอาคาร [6, 8-9] นอกเหนือจากนี้ เนื่องจาก PCM มีความสามารถดูดซับความร้อนในลักษณะความร้อนแฝง โดยมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ระหว่างการเปลี่ยนสถานะ จึงมีประโยชน์ต่อการใช้งานสำหรับการระบายความร้อนให้แก่อุปกรณ์อิเลคโทรนิค หรือ งานลักษณะอื่นๆ ที่ต้องการควบคุมให้อุณหภูมิทำงานมีค่าค่อนข้างคงที่ ตัวอย่างการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมเช่น ได้มีการใช้ PCM ในแผ่นระบายความร้อน (thermal pad) สำหรับตัวกำเนิดสัญญาณแสง laser ในอุปกรณ์การสื่อสาร เพื่อที่จะสามารถควบคุมให้ตัวอุปกรณ์มีอุณหภูมิทำงานที่คงที่

สำหรับการระบายความร้อนของ อุปกรณ์อิเลคโทรนิคที่ต้องรับภาระพลังงานที่สูงขึ้น อาจมีความจำเป็นต้องใช้ระบบระบายความร้อนแบบของเหลวระบายความร้อน เนื่องจากชุดระบายความร้อนที่เห็นทั่วไปในปัจจุบัน เช่น ครีบระบายความร้อน หรือ แบบพัดลมระบายอากาศ อาจไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ให้สม่ำเสมอ การใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับของเหลวระบายความร้อน จึงมีศักยภาพในการช่วยส่งเสริมพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนให้แก่ของเหลวระบายความร้อนได้

การผนวก PCM เข้าไปในของเหลวระบายความร้อนโดยตรงอาจก่อให้เกิดปัญหาแก่การใช้งานในระบบได้เช่น การเกาะติดกับผนังภายในระบบระบายความร้อนซึ่งทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้ หรืออาจเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PCM และ ของไหลที่ใช้ ทำให้สูญเสียสถาพการควบคุมถ่ายทความร้อนไปได้ [7] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกการสัมผัสโดยตรงระหว่าง PCM และ ของไหลระบายความร้อน โดยใช้วิธีการเคลือบผิวภายนอกของ PCM โดยสารโพลิเมอร์ซึ่งมีสภาพเป็นของแข็งตลอดวัฏจักรการทำงานภายในระบบระบายความร้อน อีกทั้งเปลือกโพลิเมอร์ที่ห่อหุ้ม PCM ยังสามารถป้องกันการกระทบกระเทือนต่อสารเปลี่ยนสถานะ ให้สามารถมีระยะเวลาการทำงานที่ดีขึ้น PCMที่ถูกเคลือบโดยสารโพลิเมอร์นี้มักมีลักษณะที่เรียกว่า micro-encapsulated phase change material (MEPCM) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-30 μm วิธีการและเทคนิคในการผลิต MEPCM บางชนิดได้ถูกอธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [5, 10] ในการใช้งาน MEPCMจะถูกผสมเข้ากับของเหลวระบายความร้อนจนมีลักษณะเป็น slurry fluid โดยที่ MEPCM จะไหลลอยไปกับของเหลวเพื่อทำหน้าที่ดูดและคายความร้อนในระบบระบายความร้อน อายุการใช้งานของ MEPCM ที่ผลิตในปัจจุบันสามารถทำงานได้มากกว่า 1000 รอบวัฏจักรของการดูดและคายความร้อน การศึกษาถึงพฤติกรรมทางความร้อนของ slurry fluid ได้มีการรายงานในเอกสารอ้างอิง [3, 7, และ 11]

การใช้ slurry fluid ที่มี MEPCM ในระบบของไหลระบายความร้อนจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบให้เหมาะสม เนื่องจากอุปกรณ์ปั๊ม เครื่องมือวัดต่างๆ ที่ใช้ทั่วไปในระบบระบายความร้อนอาจก่อให้เกิดความเสียหายให้แก่ MEPCM และลดอายุการทำงานของ MEPCM ระบบและประเภทอุปกรณ์ ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ต่อระบบระบายความร้อนได้ถูกออกแบบไว้ตามเอกสารอ้างอิง [2]

งานวิจัยที่รายงานในที่นี้ ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาถึงศักยภาพในการใช้สารเปลี่ยนสถานะในของเหลวระบายความร้อน เพื่อการปรับปรุงพฤติกรรมทางความร้อน (การถ่ายเทความร้อน และ ค่าความจุความร้อนของ) สำหรับการใช้งานในแบบจำลองชุดอุปกรณ์อิเลคโทรนิค การทดลองได้รายงานผลเปรียบเทียบค่าความจุความร้อน และ ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน ระหว่างของไหลแบบ single phase และแบบ slurry fluid ที่มี MEPCM ผสมอยู่

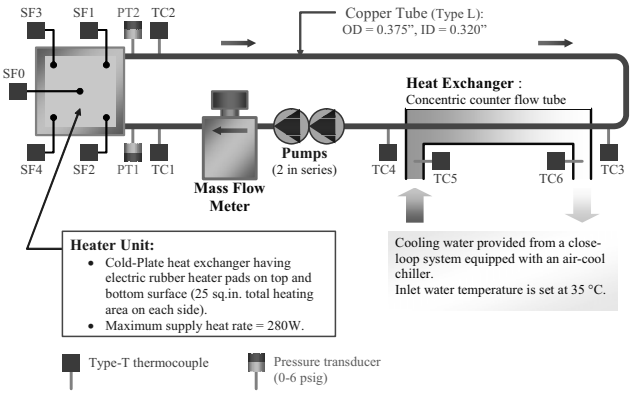
## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 ชุดทดลอง

สารเปลี่ยนสถานะใน MEPCM สำหรับการทดลองนี้ คือสาร Octacosane เนื่องจากมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะระหว่าง ของแข็ง-ของเหลว อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 60±6°C ซึ่งเหมาะสมสำหรับอุณหภูมิควบคุมของอุปกรณ์อิเลคโทรนิคทั่วไป MEPCMที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-30 μm ซึ่งมีส่วนประกอบโดยน้ำหนักของ PCM (Octacosane) ข้างใน ประมาณ 83% และส่วนเปลือกประมาณ 17%

MEPCM ถูกผสมเข้ากับของเหลวระบายความร้อนพื้นฐาน (หรือ base-fluid) ซึ่งเป็นส่วนผสม ระหว่าง Ethylene Glycol และ น้ำ ในอัตราส่วน 50/50 โดยปริมาตร MEPCMถูกผสมเข้ากับ base-fluid ในอัตราส่วน 23% โดยน้ำหนัก ทำให้ของเหลวผสม MEPCM มีลักษณะเป็น slurry fluid ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารทำงานระบายความร้อนในการทดลอง

การทดลองได้ถูกปฏิบัติโดยใช้ชุดทดลองวงจรการไหล (flow-loop) ซึ่งเป็นระบบปิด โดยมีการจัดอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในรูปด้านล่าง




รูปที่ 1 แผนภาพแสดงอุปกรณทดลอง

วงจรการไหลตามรูปที่ 1 มีการออกแบบระบบทดลองเป็นไปตามคำแนะนำใน เอกสารอ้างอิง [2] ซึ่งชุดทดลองที่ใช้มีขนาดความยาวเท่ากับ 2.4 เมตร และ กว้างเท่ากับ 0.3 เมตร โดยมีสารทำงานไหลภายในท่อทองแดงที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในระบบ ท่อทองแดงที่ใช้มีขนาด ¼ นิ้ว norminal diameter หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

เท่ากับ 0.320 นิ้ว ชุดทดลองประกอบด้วย ปั๊มแบบ magnetic-coupling สองชุด ต่อแบบอนุกรม ที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ระหว่าง 1.52 g/s ถึง 15.2 g/s (หรือ 0.2 – 2.0 $lb_m$/min) โดยที่อัตราการไหลของสารทำงานในระบบ ถูกวัดโดยเครื่องมือวัดอัตราการไหลมวลแบบ coriolis เหตุผลที่ coriolis flow meter และ magnetic-coupling pump ถูกเลือกใช้ก็เพื่อหลีกเลี่ยงการอุดตันภายในอุปกรณ์เนื่องจาก MEPCM ใน slurry fluid และลดภาระแรงปะทะแก่ MEPCM

ในชุดทดลองมีแหล่งให้ความร้อน (heater unit) ที่เป็น plate heat exchanger ซึ่งมีลักษณะจำลองแหล่งกำเนิดความร้อนของอุปกรณ์อิเลคโทรนิค ภายใน heater unit สารทำงานไหลระหว่างแผ่นอลูมิเนียมบนและล่าง ให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนรวมประมาณ 322.83 ตารางเซนติเมตร ความร้อนถูกจ่ายจากแผ่นความร้อนไฟฟ้า (electric rubber heater pad) ที่ติดอยู่ทั้งด้านบนและล่างของ heater unit และมีขนาดความร้อนสูงสุดที่ 280 W ซึ่งสามารถปรับขนาดอัตราการจ่ายพลังงานโดยใช้ rheostat และ ถูกวัดโดยใช้ current and voltage transducer

ชุดอุปกรณ์ระบายความร้อน (heat sink) เป็นแบบ concentric counter flow ที่ใช้น้ำเป็นสารระบายความร้อน โดยที่อัตราการไหลถูกวัดโดย rotameter น้ำระบายความร้อนที่ออกจากชุดระบายความร้อนถูกทำให้เย็นลงโดยใช้ refrigerant air-cooled chiller ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิน้ำไหลกลับสู่ชุด flow-loop ได้ตามต้องการ สำหรับการทดลองนี้อุณหภูมิน้ำถูกควบคุมให้คงที่ที่ 35°C

อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในระบบถูกวัดโดยใช้ thermocouple type-T ซึ่งจัดเตรียมไว้ 5 ตำแหน่งตามสัญลักษณ์ SF0 ถึง SF1 ในรูปที่ 1 สำหรับการวัดอุณหภูมิบนแผ่น heater unit และจัดเตรียมไว้ 6 ตำแหน่งตามสัญลักษณ์ TC1 ถึง TC6 สำหรับการวัดอุณหภูมิของสารทำงานและน้ำระบายความร้อน pressure transducer (PT1 และ PT2) ถูกใช้สำหรับวัดความดันของสารทำงานที่ทางเข้าออก heater unit

สัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ถูกส่งมาเพื่อบันทึกประมวลผลโดยชุดประมวลผลข้อมูล (data acquisition system หรือ DAQ) ซึ่งประกอบด้วย คอมพิวเตอร์, data acquisition card, SCXI module และ terminal box ข้อมูลจากการทดลองถูกบันทึกเมื่อระบบเข้าสู่ steady-state โดยที่ DAQ จะอ่านสัญญาณจากเครื่องมือวัดทุกๆ 1-5 วินาที 50-100 ครั้งสำหรับข้อมูลแต่ละประเภท

**2.2 ขั้นตอนการทดลอง**

การทดลองมีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะ MEPCM ต่อพฤติกรรมทางความร้อนของ ของไหลระบายความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบ ค่าความจุความร้อน (heating capacity) และค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) ของสารระบายความร้อนใน heater unit ระหว่าง ชนิดที่ไม่มี MEPCM ผสม (base-fluid) และ ชนิดที่มี MEPCM ผสม (slurry fluid)

การศึกษาที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้ ได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของสารทำงานแปรเปลี่ยนระหว่าง 2.12 g/s – 11.4 g/s (หรือ 0.28-1.5 $lb_m$/min) โดยการตั้งอัตราไหลของน้ำระบายความร้อนคงที่ที่ 0.2 gallon ต่อ นาที และ ขนาดทำความร้อนของ heater unit คงที่ที่ 280 W จากการทดลองพบว่าที่ขนาดจ่ายความร้อนนี้ สารทำงานสามารถได้รับปริมาณความร้อนในอัตราประมาณ 253 W (±3%) ส่วนที่เหลือสูญเสียสู่สภาพแวดล้อม

การทดลองเริ่มโดยการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของ base-fluid ใน flow-loop โดยการบันทึกข้อมูลตามเงื่อนไขการทดลองดังกล่าวข้างต้น เพื่อนำมาคำนวณหา ค่าความจุความร้อน และ ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน ของ base-fluid ใน heater unit ที่ค่าอัตราการไหลมวลที่แตกต่างกัน ค่าที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป จากนั้นสารทำงานใน flow-loop ถูกเปลี่ยนเป็น slurry fluid ที่มี MEPCM ผสมอยู่ การทดลองได้ดำเนินการเพื่อคำนวณค่า ค่าความจุความร้อน และ ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน ของ slurry fluid ใน heater unit ค่าจากการคำนวณที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลของการทดลองอ้างอิงที่ได้จาก base-fluid เพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของ MEPCM ต่อค่าความจุความร้อน และ ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน ของของเหลวระบายความร้อน

ในการคำนวณ ค่าความร้อน ($Q_{mea}$) ที่ถ่ายเทไปยังสารทำงานภายใน heater unit หาได้จาก

$$Q_{mea} = \dot{m} C_p \left( T_{out} - T_{in} \right) \tag{1}$$

$Q_{mea}$ = อัตราพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับ

$T_{in}$ และ $T_{out}$ = อุณหภูมิของสารทำงานที่ทางเข้าและออกของ heater unit ตามลำดับ

$\dot{m}$ = อัตราการไหลมวลของสารทำงาน

$C_p$ = ค่าความจุความร้อนของสารทำงาน

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของผลคูณกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$hA = \frac{Q_{mea}}{\left( T_{SFavg} - T_{avg} \right)} \tag{2}$$

$hA$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปของผลคูณกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

$T_{SFavg}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวของ heater unit หาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จาก thermocouple SF0 ถึง SF4

$T_{avg}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำงานระหว่างทางเข้าและออกของ heater unit

ค่าความจุความร้อนของ น้ำและ Ethylene Glycol ซึ่งใช้เป็นสารผสมใน base-line fluid มีค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ได้ถูกคำนวณตามสมการที่แนะนำในเอกสารอ้างอิง [1] และ ถูกนำมาใช้ประมาณค่าความจุความร้อนของสารผสม base-fluid หรือ $Cp_{bsl}$ บนพื้นฐานของอัตราส่วนมวลของสารผสมที่ใช้ ค่า $Cp_{bsl}$ จากการคำนวณที่ 300 K ได้เท่ากับ 3.253 kJ/kg-K

ค่าความจุความร้อนของของ slurry fluid ถูกคำนวณในรูปของค่าความจุความร้อนประสิทธิผล หรือ $Cp_{eff}$ เนื่องจากการดูดซับความร้อนของ slurry fluid ซึ่งประกอบด้วยความร้อนสัมผัส (sensible heat)

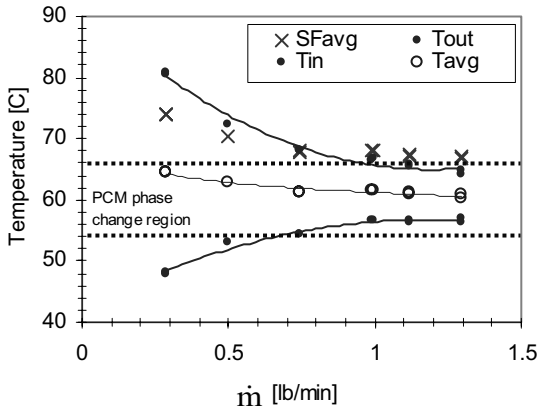
เนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิของ slurry fluid และ ความร้อนแฝงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะ Octacosane ค่าความจุความร้อนประสิทธิผลของ slurry fluid สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$Cp_{eff} = \frac{Q_{mea}}{\dot{m}(T_{out} - T_{in})} \quad (3)$$

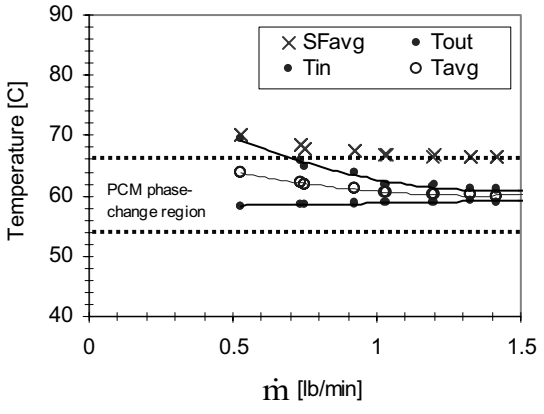
$Cp_{eff}$ = ค่าความจุความร้อนประสิทธิผลของ slurry fluid

**3. ผลการศึกษา**

รูปที่ 2 และ 3 แสดงผลอุณหภูมิจากการทดลองที่ใช้ base-fluid และ slurry fluid ในส่วนของ heater unit




รูปที่ 2 ผลการทดลองจาก base-line fluid (single phase fluid) แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในชุด heater unit

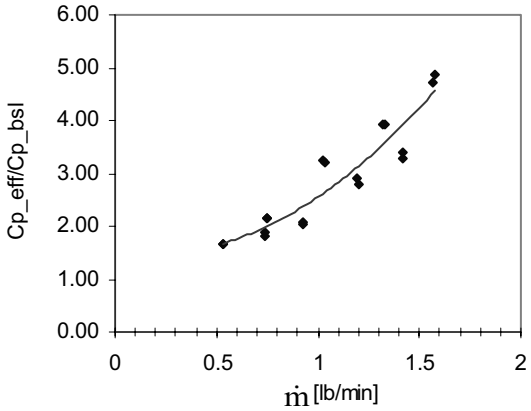



รูปที่ 3 ผลการทดลองจาก slurry fluid (two phase fluid) แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในชุด heater unit

ผลการทดลองในรูปที่ 2 แสดงถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำงาน base-fluid ที่ทางเข้า (Tin) และ ทางออก (Tout) ของ heater unit ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 22°C (ที่อัตราการไหลประมาณ 0.5 $lb_m$/min) และ 9°C (ที่อัตราการไหลประมาณ 1.3 $lb_m$/min) ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำงานที่ทางเข้าและออก heater unit ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเหลือประมาณ 11°C (ที่อัตราการไหลประมาณ 0.5 $lb_m$/min) และ 2°C (ที่อัตราการไหล 1.3 $lb_m$/min) เมื่อใช้ slurry fluid เป็นสารทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิของ slurry fluid อยู่ในช่วงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ Octacosane (54-66°C) ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้การดูดซับความร้อนแบบความร้อนแฝงของ MEPCM มีบทบาทอย่างมากในการระบายความร้อนของสารทำงาน

การใช้ slurry fluid เป็นสารทำงานส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผิว heater unit มีความเสถียรมากขึ้นกว่าการใช้ base-fluid ตลอดช่วงอัตราการไหลที่พิจารณาในการทดลอง โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิ slurry fluid ที่ทางออกของ heater อยู่ภายในช่วงการเปลี่ยนสถานะของ MEPCM ดังแสดงโดยสัญลักษณ์กากบาทในรูปที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความร้อนแฝงของ Octacosane ภายใน MEPCM ในการดูดซับความร้อนจากผนังของ heater unit ที่อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างทางเข้าและออก heater unit ของสารทำงาน (Tavg) มีค่าประมาณใกล้เคียงกันระหว่างการทดลองทั้งสองแบบ

ผลของอุณหภูมิที่วัดได้ ถูกนำมาคำนวณหาค่าความจุความร้อน $Cp_{bsl}$ สำหรับสารทำงาน base-fluid และ $Cp_{eff}$ สำหรับสารทำงาน slurry fluid โดยที่ค่าอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่าง $Cp_{eff}$ ต่อ $Cp_{bsl}$ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4

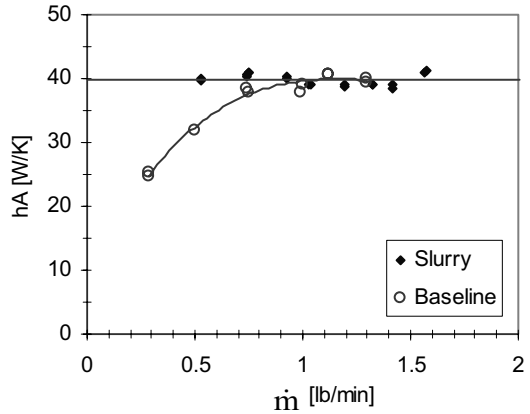



รูปที่ 4 อัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่าง $Cp_{eff}$ ต่อ $Cp_{bsl}$

ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 แสดงถึงค่าความจุความร้อนของสารทำงาน slurry fluid ที่มีมากกว่า base-fluid อันเนื่องมาจากอิทธิพลของ MEPCMที่ใช้ อย่างไรก็ตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความจุความร้อนเมื่อใช้ MEPCM ซึ่งเพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.5 ถึง 5 เท่าตัว แปรผันตามกับอัตราการไหลของมวลจาก 0.5 ถึง 1.5 $lb_m$/min เหตุผลที่ค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความจุความร้อนน้อยลง ที่อัตราการไหลน้อยลงเนื่องมาจาก slurry fluid มีระยะเวลาการไหลภายใน heater unit นานขึ้น ทำให้ต้องดูดซับปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลในปริมาณที่มากขึ้น เป็นผลให้ MEPCM ส่วนหนึ่งใช้ปริมาณความร้อนแฝงที่มีอยู่จนหมด และ Octacosane เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ทำให้การดูดซับความร้อนเป็นไปในลักษณะความร้อนสัมผัส ส่งผลให้ค่าความจุ

ความร้อนของ slurry fluid มีค่าใกล้เคียงกับของ base-fluid มากขึ้น ในทางตรงข้ามที่อัตราการไหลที่สูงการดูดซับความร้อนภายใน heater unit ของ MEPCM ต่อหนึ่งหน่วยมวลมีค่าลดลง และการดูดซับความร้อนเกือบทั้งหมดเป็นแบบความร้อนแฝง ซึ่งเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ slurry fluid ที่ทางเข้าและออก heater unit มีค่าน้อยลงมากที่อัตราการไหลสูงขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน heater unit ของสารทำงานทั้งสองชนิดถูกแสดงเปรียบเทียบกันในรูปที่ 5




รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบระหว่าง base-fluid และ slurry fluid

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ slurry fluid มีค่าสม่ำเสมอตลอดช่วงอัตราการไหลที่พิจารณา ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ base-fluid มีค่าลดลงที่อัตราการไหลของสารทำงานช้าลง จากรูปที่ 5 ที่อัตราการไหลประมาณ 0.5 $lb_m$/min ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ slurry fluid มีค่าประมาณ 20% สูงกว่าของ base-fluid เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2) เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ base fluid จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยผนัง heater และ อุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำงานมีค่าสูงขึ้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 สำหรับการทดลองที่ใช้ base-fluid สำหรับการทดลอง slurry fluid ซึ่งให้ผลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยผนัง heater unit ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ สามารถรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยผนังและสารทำงาน ไม่ให้มีความแปรผันมากนักตลอดช่วงอัตราการไหล เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ slurry fluid มีค่าค่อนข้างคงที่ จากผลการทดลองสามารถระบุได้ว่า การเปลี่ยนสถานะของ MEPCM สามารถช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลระบายความร้อนมีค่าสูงกว่า ของไหลระบายความร้อนแบบ single phase โดยเฉพาะเมื่ออัตราการดูดซับความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลมีค่ามากขึ้น ดังที่ปรากฏในผลการทดลองเมื่ออัตราการไหลมวลผ่าน heater unit ช้าลง

**4. สรุป**

การศึกษาได้ทำการทดลองเพื่อ แสดงถึงอิทธิพลของการใช้สารเปลี่ยนสถานะต่อค่าความจุความร้อน และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเพื่อการระบายความร้อนใน plate heat exchanger ซึ่งจำลองการถ่ายเทความร้อนของ อุปกรณ์อิเลคโทรนิก สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นแบบ micro-encapsulated phase-change material ที่ถูกนำมาผสมกับของเหลวผสมระหว่าง ethylene glycol และ น้ำ ในลักษณะ slurry fluid สารเปลี่ยนสถานะใน MEPCM ที่เลือกใช้คือ Octacosane ซึ่งมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะประมาณ 60±6°C

จากผลการทดลองที่ได้ สามารถระบุได้ว่าอิทธิพลจากการดูดซับพลังงานความร้อนแบบความร้อนแฝง ของสารเปลี่ยนสถานะใน MEPCM ในของเหลวระบายความร้อน สามารถเพิ่มค่าความจุความร้อนได้มากถึงเกือบ 5 เท่าตัว และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้มากถึง 20% อีกทั้งยังสามารถช่วยให้อุณหภูมิผนังของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอคงที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิผลของการใช้ MEPCM ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของ slurry fluid ที่พิจารณาในการศึกษานี้ ซึ่งการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของของไหลผ่าน heater มีผลต่อการดูดซับพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารระบายความร้อน

ถึงแม้ว่าจากผลการทดลองที่รายงานในที่นี้ แสดงให้เห็นว่าการใช้ MEPCM จะให้ผลต่อการปรับปรุงพฤติกรรมทางความร้อนของของไหลระบายความร้อน การเลือกใช้ประเภทสารเปลี่ยนสถานะ อัตราการไหลของ slurry fluid และ อัตราส่วนผสมของ MEPCM ในของเหลว ที่เหมาะสม จำเป็นต้องต้องมีการออกแบบ และ ปรับให้เหมาะกับสภาพการใช้งานของแต่ละระบบๆไป เพื่อให้อิทธิพลของการใช้ สารเปลี่ยนสถานะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

**7. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณ Prof. Richard Gould และ Prof. Jame Mulligan จาก North Carolina State University สำหรับคำแนะนำที่มีคุณค่าต่อการศึกษาทดลอง ผู้เขียนยังขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม สำหรับการสนับสนุนในการเสนอผลงานวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

[1] AIChE, 1985. Data Complilation Tables of Properties of Pure Compounds. Department of Chemical Engineering, Penn State University.

[2] Colvin, D.P., and Mulligan, J.C., 1990. Method of Using a PCM Slurry to Enhance Heat Transfer in Liquids. U.S. Patent 4911232

[3] Colvin, D., Moody, D., Driscoll, Windheim, J.V., Jagannadham, K., and Mulligan, J.C., 1997. Thermal Management of Electronic Systems Using Diamond Heat Spreaders and Microencapsulated PCM Coolants. AIAA-1997-3888, 1997 National Heat Transfer Conference,

American Institute of Aeronautics and Astronautics, Baltimore, MD, Aug. 10-12.

[4] Feldman, D., et al, 1995. Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 36, pp. 147-157.

[5] Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., and Zhu, H.J., 2002. Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Experiments and Simulation. International Journal of Energy Research, Vol. 26, Issue 2, pp 159 – 171

[6] Ismail, K.A.R., and Castro, J.N.C., 1997. PCM Thermal Insulation in Building. Interational Journal of Energy Research, Vol. 21, pp. 1281-1296.

[7] Mulligan, J.C., Colvin, D.P., and Bryant, Y.G., 1994. Use of Two-Component Fluids of Microencapsulated Phase-Change Materials for Heat Transfer in Spacecraft Thermal Systems. AIAA-1994-2004 AIAA and ASME, Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 6th, Colorado Springs, CO, June 20-23.

[8] Neeper, D.A., 2000. Thermal Dynamics of Wallboard with Latent Heat Storage. Solar Energy, Vol. 68, No. 5, pp. 393-403.

[9] Stovall, T.K., and Tomlinson, J.J., 1995. What are the Potential Benefits of Including Latent Storage in Common Wallboard?. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117.

[10] Su, J., Wang, L., Ren, L., 2006. Fabrication and Thermal Properties of MicroPCMs: Used Melamine-Formaldehyde Resin as Shell Material. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 101, Issue 3, pp 1522 – 1528.

[11] Yamagishi, Y., Takeuchi, H., Pyatenko, A.T., Kayukawa, N., 1999. Characteristics of Microencapsulated PCM Slurry as a Heat-Transfer Fluid. AIChE Journal, Vol. 45, Issue 4, pp 696 - 707