

ผลกระทบของการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อนของหน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ของไหลนาโนชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ

Effects of fouling formation in the cooling system of a central processing unit using Titanium Dioxide nanofluid

ชยุต พลอยจิรภาส¹, ดวงฤดี ชูตระกูล¹ และขวัญชัย หนาแน่น^{1*}

Chayut Ployjirapas¹, Duangrudee Chutrakul¹ and Kwanchai Nanan^{1*}

Received: 21 January 2025 ; **Revised:** 10 March 2025 ; **Accepted:** 21 April 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อน CPU โดยได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลักเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพระบบระบายความร้อนของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ในส่วนแรก ได้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ (0.02 Vol.%, 0.05 Vol.%, 0.1 Vol.%, และ 0.15 Vol.%) ในการลดอุณหภูมิของ CPU เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำธรรมดาและระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม (Heat Sink) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของอนุภาคนาโน TiO_2 เท่ากับ 0.05 Vol.% ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยลดอุณหภูมิ CPU ได้เฉลี่ย 0.9 °C เมื่อเทียบกับน้ำธรรมดา และมากถึง 15.9 °C เมื่อเทียบระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม ในส่วนที่สอง ความเข้มข้นของอนุภาคนาโน TiO_2 เท่ากับ 0.05 Vol.% ถูกนำไปทดสอบในการใช้งานระยะยาวเป็นเวลา 12 เดือน เพื่อประเมินผลกระทบจากการเกิดตะกอนในระบบ ผลการทดลองพบว่าระบบระบายความร้อนยังคงมีประสิทธิภาพดีในช่วง 5 เดือนแรก แต่เริ่มลดลงในระยะถัดมาและทำให้อุณหภูมิของ CPU เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.1 °C เนื่องจากตะกอนทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.05 Vol.% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้ดี โดยควรเปลี่ยนของไหลทุก 5 เดือน

คำสำคัญ: ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ, ตะกอน, หน่วยประมวลผลกลางคอมพิวเตอร์

Abstract

This research investigates the effects of fouling formation in the Cooling System of a CPU, divided into two main parts to enhance the cooling efficiency of central processing units (CPU). The first part focuses on identifying the optimal concentration of TiO_2 /water nanofluids (0.02 Vol.%, 0.05 Vol.%, 0.1 Vol.%, and 0.15 Vol.%) for reducing CPU temperatures compared to water-based cooling and heat sink systems. The results indicate that a 0.05 Vol.% concentration provides the best performance, reducing CPU temperatures by an average of 0.9 °C compared to water and 15.9 °C compared to heat sinks. In the second part, the optimal concentration (0.05 Vol.%) was tested over 12 months to evaluate the effect of fouling on the system. The findings reveal that the cooling system maintains high efficiency during the first five months but starts to degrade thereafter. CPU temperatures increased by an average of 1.1 °C due to fouling acting as a thermal insulator. This study highlights that TiO_2 /water nanofluids at a 0.05 Vol.% concentration can significantly enhance cooling performance, with fluid replacement recommended every five months to sustain efficiency.

Keywords: TiO_2 /water nanofluid, fouling, central processing units (CPU)

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

¹ Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi Province

* Corresponding author, e-mail: kwanchai.nanan@mail.pbru.ac.th

บทนำ

เทคโนโลยีต่างๆ ของโลกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและไม่หยุดยั้งเนื่องจากเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์โดยถูกนำมาประยุกต์ใช้และพัฒนาในด้านต่างๆ เช่นการพัฒนาอุตสาหกรรม การพัฒนาด้านการเกษตร และการพัฒนาด้านการสื่อสาร ยิ่งไปกว่านั้นการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมขั้นสูงเช่น กลุ่มปัญญาประดิษฐ์ เป็นไปอย่างก้าวกระโดดในระยะเวลา 1 ทศวรรษที่ผ่านมา ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญของการพัฒนาประเทศสู่การพัฒนาในอนาคต “หน่วยประมวลผลกลาง คอมพิวเตอร์หรือ Central Processing Unit, CPU” เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมากในการประมวลผลเพื่อควบคุม ตัดสินใจ และสั่งการเครื่องจักรหรือเทคโนโลยีนั้นๆ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง แต่สมรรถนะหรือความสามารถในการทำงานสูงขึ้น จึงทำให้ฟลักซ์ความร้อน (ค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยพื้นที่) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามเช่นกัน ซึ่งในปัจจุบันการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ CPU ด้วยอากาศไม่เพียงพอต่อการใช้งานในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยน้ำมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแนวทางการพัฒนาที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัยอย่างกว้างขวางคือ การเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบระบายความร้อนโดยเฉพาะในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยของไหลนาโน (Nanofluids) แทนที่ของไหลพื้นฐานทั่วไปเช่น น้ำ น้ำมัน และเอทิลีนไกลคอล อันเกิดจากข้อได้เด่นของอนุภาคนาโนที่มีค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่าน้ำหลาย 100 เท่า เมื่อนำอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็งผสมในของไหลพื้นฐานจะเกิดเป็นของไหลชนิดใหม่ที่เรียกว่า “ของไหลนาโน” ซึ่งเป็นของไหลที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นได้ ส่งผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ระบายความร้อนลดขนาดของปั๊ม และประหยัดพลังงานลงได้โดยอนุภาคนาโน (nanoparticles) เป็นวัสดุนาโนกลุ่มหนึ่งที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) ซึ่งสมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคนาโนเหล่านี้มีความแตกต่างจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่อย่างสิ้นเชิง อนุภาคนาโนได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภทตามคุณสมบัติของอนุภาคนั้นๆ เช่นอนุภาคนาโนของทอง มีประโยชน์ทางด้านการสังเคราะห์ชั้นเดียวแบบประกอบตัวเองซึ่งถูกนำไปใช้เป็นนาโนเซ็นเซอร์และเป็นตัวตรวจวัดในอุปกรณ์เซ็นเซอร์ได้แต่ราคาค่อนข้างสูง ในขณะที่อนุภาคนาโนของไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งมีราคาถูก โดยงานวิจัยนี้ถูกนำไปใช้เป็นของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ เพื่อใช้ศึกษา/วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเพิ่มประสิทธิภาพ

การถ่ายเทความร้อนจากนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศอย่างแพร่หลาย ของไหลนาโนเป็นสารแขวนลอยของอนุภาคนาโน ซึ่งมีแนวโน้มใช้เป็นของไหลเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน มีการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีการนำความร้อนและคุณสมบัติเชิงรีโอโลยี (rheological properties) ที่ดีกว่า (Ali & Salam, 2020) ได้สืบค้นการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ของไหลนาโน การเพิ่มเสถียรภาพ ลักษณะทางฟิสิกส์ การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน และปัจจัยต่างๆ เช่นขนาดอนุภาค รูปร่าง สารตั้งต้น อุณหภูมิ ฯลฯ เกี่ยวกับการนำความร้อน การศึกษาค้นคว้านี้เผยให้เห็นการใช้งานที่เป็นไปได้โดยการใช้ของไหลนาโน เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การทำความเย็นในการขนส่ง การทำความเย็นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การทำความเย็นทางอุตสาหกรรม ระบบนิวเคลียร์ การทำงานของเครื่องจักร พลังงานแสงอาทิตย์และการแยกเกลือออกจากน้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งจากการสืบค้นยังมีอุปสรรคการใช้งานและความท้าทาย โอกาสในการวิจัยต่อไป ส่วนการนำของไหลนาโนในระบบระบายความร้อน CPU ด้วยของไหลน้ำ (Naphon & Wongwises, 2010) ได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนด้วยเจ้าของเหลวในครีระบายความร้อนสำหรับหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การทดลองมีการทดสอบค่าความร้อน ความกว้างของช่องทางที่แตกต่างกันภายใต้สภาพการใช้งานจริง CPU ทำงานเต็มที่ 100% ระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวหรือน้ำผ่านครีบสีเหลืองของบล็อก CPU พบว่าอุณหภูมิหน่วยประมวลผลกลางที่ได้รับจากระบบเจ้าของเหลวจะต่ำกว่าระบบระบายความร้อนจากของเหลว น้ำ ผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้านี้จะนำไปสู่แนวทางที่จะช่วยให้การออกแบบระบบทำความเย็นของการระบายความร้อนด้วยที่ดีขึ้น ผลการดำเนินงานเพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ในที่เฉพาะเจาะจงช่วงอุณหภูมิ

การใช้ของไหลนาโนร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Ma et al., 2006) ได้ทำการทดลองโดยประยุกต์ใช้ของไหลนาโนที่ใช้อนุภาคนาโนของเพชรที่ความเข้มข้น 1 Vol.% กับท่อความร้อนแบบสันโดยพบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากที่อัตราการป้อนความร้อน 80 W พบว่าสามารถลดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างตัวคอนเดนเซอร์กับอีวาพอเรเตอร์ได้จาก 40.9°C เป็น 24.3°C ขณะที่ (Duangthongsuk & Wongwises, 2009). ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ที่ความเข้มข้น 0.2% โดยปริมาตร เป็นสารทำงานพบว่าของไหลนาโนทำให้ระบบมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นจากสารทำงานเดิมที่เป็นน้ำ อีกทั้งพบว่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของไหลน้ำ

(Abbasian Arani & Amani, 2013) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของน้ำกลั่นผสมสารนาโน TiO_2 ที่ความเข้มข้น 0.01 Vol % ถึง 0.02 Vol % และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสาร 10, 20, 30 และ 50 nm โดยการไหลแบบปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์ 8,000 – 51,000 ผลการทดลองพบว่าค่าถ่ายเทความร้อนสูงกว่าของเหลวพื้นฐาน และค่าการถ่ายเทความร้อนไม่เพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของสารนาโน TiO_2 และอนุภาคนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 nm มีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Khedkar *et al.*, 2014) ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ของไหลนาโน TiO_2 สำหรับหล่อเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ท่อภายในทำจากท่อทองแดง ความยาว 1,000 mm ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ใช้ของไหลนาโนเป็นสารหล่อเย็นสูงกว่าที่ใช้น้ำและอัตราการถ่ายเทความร้อนก็เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไหลนาโนด้วย (สหัสวัต แศวรัมย์ย์, 2564) ต้องการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายค่าการนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนืด และความหนาแน่น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบส่งไปข้างหน้าและแบบส่งไปข้างหน้าและด้านหลัง ใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบ Levenberg-Marquard จากการพัฒนาได้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และความหนืดของไหลไฮบริดนาโนได้ค่า R มากกว่า 0.9 สำหรับการสอน การตรวจสอบ และการทดสอบ เมื่อนำค่าสมบัติการนำความร้อนไปประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์พบว่า ของไหลไฮบริดนาโน (CuO และ MgO) มีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อกำหนดให้กระบวนการมีความเข้มข้นของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์สูงสุด ล่าสุด (คมกฤษณ์ ชัยโย, 2567) ได้ทำการการจำลองเชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของไหลนาโนฟุ้งชนแบบราบเรียบบนแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีครีบบระบายความร้อนด้วยแบบจำลองเดี่ยว ภายใต้ขอบเขตทางความร้อนที่ครีบบระบายความร้อนมีพื้นผิวร้อนแบบอุณหภูมิคงที่ ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มถูกใช้เพื่อหาผลเฉลยของสมการควบคุมการถ่ายเทความร้อน และการไหลโดยใช้ของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารทำงานที่มีความเข้มข้นโดยปริมาตรอยู่ระหว่าง 0% ถึง 4% การคำนวณได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาคนาโนและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ผลการคำนวณที่ได้พบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาคนาโนและ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพ

เบอร์ ณ ตำแหน่ง Stagnation ตำแหน่งใดๆ และค่าประสิทธิภาพเบอร์เฉลี่ย นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบชนิดของของไหลนาโนระหว่างของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์กับของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) พบว่าของไหลนาโนอะลูมิเนียมออกไซด์ให้การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าของไหลนาโนไทเทเนียมออกไซด์ ล่าสุด (Liu *et al.*, 2025) ได้ใช้ของไหลนาโน CuO /น้ำ เป็นของไหลทำงานในระบบปั๊มความร้อนแบบต่อกับพื้นและประเมินประสิทธิภาพทั้งเชิงตัวเลขและเชิงทดลอง ในขั้นต้นได้มีการดำเนินการตรวจสอบเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลนาโนและการถ่ายเทพลังงานภายในท่อเกลียวภายใต้เงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิผนังคงที่ โดยใช้แบบจำลองเฟสเดียวที่เป็นเนื้อเดียวกัน แบบจำลองการกระจายความร้อนและแบบจำลองเฟสแยกจากกัน ตามลำดับ จากนั้นจึงเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความแม่นยำและความสามารถในการนำไปใช้ของแบบจำลอง ผลแบบจำลองการกระจายความร้อนแสดงให้เห็นถึงความเรียบง่ายและความแม่นยำสูง ทำให้เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลนาโนและการถ่ายเทความร้อนในระบบปั๊มความร้อนแบบต่อกับพื้นจากแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนได้พัฒนาและผ่านการตรวจเทียบกับข้อมูลการทดลอง โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.94%

ด้วยคุณสมบัติเด่นของอนุภาค TiO_2 จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ที่เหมาะสมต่อสมรรถนะทางความร้อนของระบบระบายความร้อน CPU สมรรถนะสูง และศึกษาผลกระทบของการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อนที่ใช้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ภายใต้การใช้งานในระยะยาวต่อเนื่อง 12 เดือน ในสภาพการทำงานจริงของระบบระบายความร้อนของ CPU โดยใช้คอมพิวเตอร์ Dell Vostro 270 ซึ่งมีหน่วยประมวลผลกลาง Core i5 Processor No 3450 ที่ใช้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาระบบระบายความร้อนในอนาคต

การทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

การเตรียมของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ มีขั้นตอนดังแสดงใน Figure 1 เมื่อเทน้ำที่ผสมกับอนุภาคนาโน (TiO_2) ลงไปในบีกเกอร์แล้ว จากนั้นนำไปวางบนตะแกรงในเครื่องสั่น Ultrasonic โดยตั้งเวลาในการทำงานของเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ที่ความเข้มข้นตามของเขตการทดลองเพื่อนำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป



Figure 1 Preparation of TiO_2 /Water nanofluid.

สำหรับ Figure 2 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ชุดทดลอง ประกอบด้วยถังบรรจุของไหล ระบบระบายความร้อน CPU ด้วยของไหล เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบต้านทาน (RTD) เครื่องบันทึกข้อมูล และวัดมิติเตอร์แบบแคลมป์ของ Fluke รุ่น 325 แหล่งกำเนิดความร้อนคือหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i5 รุ่น 3450 (77 W) ซึ่งเป็น CPU ที่นิยมใช้กันทั่วไป ใช้โปรแกรม FurMark เวอร์ชัน 1.19.0.0 จำลองการทำงานของ CPU พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบระบายความร้อนทำจากทองแดง มีขนาด 40 มม. × 40 มม. × 14 มม. ท่อทางเข้าระบบระบายความร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ใช้ RTD (Resistance Temperature Detector) สำหรับวัดอุณหภูมิของ CPU และของไหลที่ทางเข้าและออก ระบบระบายความร้อน ของไหลที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นตามปริมาตรที่ 0.02%, 0.05%, 0.1% และ 0.15% ตามลำดับ ถูกสูบล้างด้วยปั๊มหมุนเวียนภายใต้กำลังขับปั๊มคงที่ให้อัตราการไหลเชิงมวลอยู่ในช่วง 0.013 – 0.0138 kg/s (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นตามปริมาตร) ที่ลักษณะการไหลตามเลขเรย์โนลด์ส์ 1565-2104 (พิจารณาที่ตำแหน่งทางเข้า) รายละเอียดของผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับการทดลองได้นำเสนอตั้ง Table 1

Table1 Details of the experimental uncertainties.

Variables	Uncertainty (%)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	3.4
Mass flow rate (kg/s)	5.1

ภายใต้สภาวะคงตัว อัตราการถ่ายเทความร้อนของไหลนาโนที่ไหลผ่าน CPU คำนวณได้จากสมการ

$$q_{nf} = \dot{m} C_{p,nf} (T_{nf,out} - T_{nf,in}) \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{m}$ และ $C_{p,nf}$ คือ อัตราการไหลของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ตามลำดับ ส่วน $T_{nf,in}$ และ $T_{nf,out}$ คืออุณหภูมิทางเข้าและทางออกของของไหลนาโน

ค่าความหนาแน่นคำนวณได้จากกฎการผสมพื้นฐาน (Basic Mixing Rule) สำหรับของผสม ดังนี้

$$\rho_{nf} = \phi \rho_w + (1 - \phi) \rho_{np} \quad (2)$$

โดยที่ ρ_{nf} คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน (kg/m^3)
 ρ_{np} คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน (kg/m^3)
 ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 ϕ คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโน

ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($C_{p,nf}$) หาได้จากสมการ

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_{np} C_{p,np} + (1 - \phi) \rho_w C_{p,w}}{\rho_{nf}} \quad (3)$$

ความหนืดของอนุภาคทรงกลมของสารนาโนที่ความเข้มข้นไม่เกิน 5.0 Vol.% คำนวณได้จากสมการทั่วไปของ Einstein (1911) โดยที่ η คงที่เท่ากับ 2.5

$$\mu_i = \mu \phi + \eta \phi \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลนาโน (k_{nf}) หาได้จากสมการของ Maxwell (1954)

$$\frac{k_{nf}}{k_w} = \frac{k_{np} + 2k_w}{k_{np} + 2k_w} \frac{2\phi(k_{np} - k_w)}{\phi(k_{np} - k_w)} \quad (5)$$

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของอนุภาคนาโนในของไหลนาโน ใช้สมการ

$$\phi = \frac{\frac{W_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{W_{np}}{\rho_{np}} + \frac{W_w}{\rho_w}} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่

W_{np} : มวลของอนุภาคนาโน (kg)

W_w : มวลของของไหลพื้นฐาน (kg)

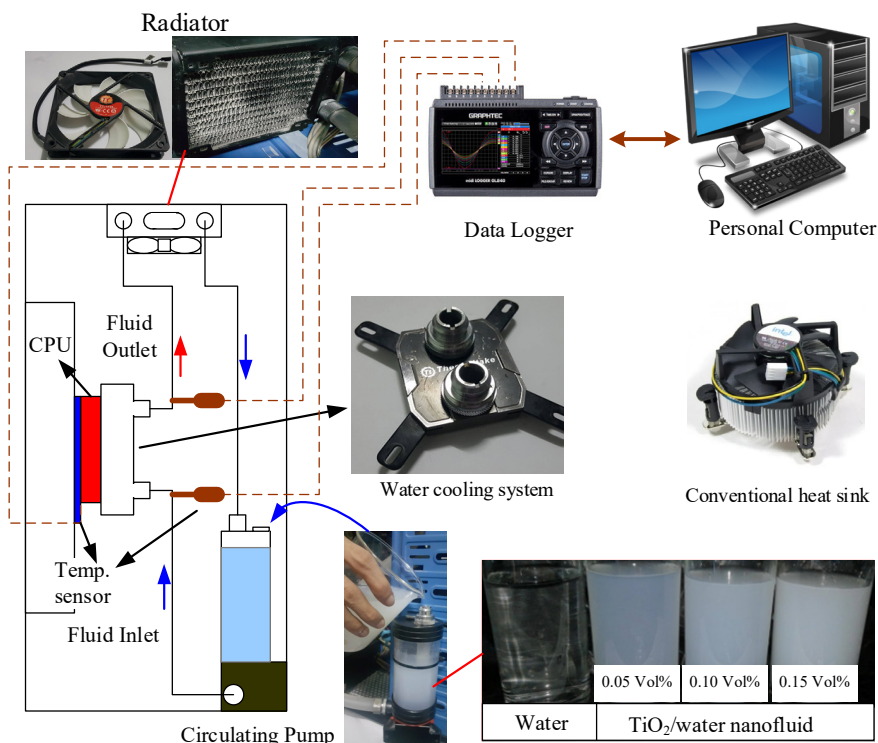


Figure 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ได้แบ่งออกเป็น 7 กรณีศึกษา ซึ่งใช้โปรแกรม FurMark ในการจำลองการทำงานของ CPU เพื่อให้ได้ภาระโหลดสูงสุด เริ่มจากกรณีศึกษาที่ 1 คือ ระบบระบายความร้อน CPU ด้วยครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม (Heat Sink) เมื่อติดตั้งครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม รออุณหภูมิห้องที่ประมาณ 29 °C จึงเริ่มบันทึกค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) โดยจะบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 60 วินาที เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที จึงเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ให้ทำงานในสภาวะไม่มีโหลดความร้อน หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงนาทีที่ 18 จึงเริ่มเปิดโปรแกรม FurMark เพื่อจำลองการทำงานของ CPU ในสภาวะโหลดสูงสุดซึ่งระบบจะทำงานจนครบ 42 นาที ซึ่งเป็นการสิ้นสุดของการทดลองในกรณีแรก จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนอุปกรณ์เป็นชุดระบายความร้อนด้วยของไหล ซึ่งแบ่งออกเป็นของไหลที่ใช้ทำงานประกอบด้วย น้ำ และของไหลนาโน TiO_2 ความเข้มข้นเชิงปริมาตรที่ 0.02%, 0.05%, 0.1% และ 0.15% โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับกรณีแรก ซึ่งจะได้ผลการศึกษาตามกรณีศึกษาที่ 2-6 ตามลำดับ ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ทั้ง อุณหภูมิของพื้นผิว CPU อุณหภูมิน้ำเข้า และอุณหภูมิน้ำออก CPU ภายใต้การทดลองที่อุณหภูมิห้องเดียวกันจะถูกนำไปประเมินหาความเข้มข้นเชิงปริมาตรของของไหลนาโน TiO_2 ที่เหมาะสมสำหรับระบบระบายความร้อน CPU ต่อไป

เมื่อได้ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรของของไหลนาโน TiO_2 ที่ดีที่สุด ขั้นตอนการทดลองต่อไปเป็นการทดสอบถึงผลกระทบของการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อน CPU เป็นกรณีศึกษาที่ 7 ขั้นตอนการทดลองทำได้เช่นเดียวกับก่อนหน้านี้นี้โดยได้ทดสอบผลกระทบของการเกิดตะกอนต่อระบบระบายความร้อนเป็นระยะเวลา 12 เดือน ซึ่ง จะทำการทดลองหลังจากใช้งานต่อเนื่องทุกๆ เดือน ซึ่งแต่ละครั้งจะทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จาก Figure 3 แสดงผลอุณหภูมิของการระบายความร้อนหน่วยประมวลผลกลางคอมพิวเตอร์ด้วยครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional heat sink) หล่อเย็นด้วยน้ำ (Water as coolant) และของไหลนาโน TiO_2 ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.05\%$, $\phi = 0.1\%$ และ $\phi = 0.15\%$ ตามลำดับ

กรณีแรกครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional heat sink) ซึ่งแกนตั้ง คือ อุณหภูมิของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (°C) เปรียบเทียบกับแกนนอน คือ เวลา (sec) ในการทดลองแต่ละเงื่อนไขได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือ โดยได้ทดลองในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 29 °C ในช่วงเริ่มต้นของการ

ทดลองที่เวลา 0 – 120 วินาที อุณหภูมิของ CPU มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศแวดล้อม (อุณหภูมิห้อง) เมื่อเปิดคอมพิวเตอร์ อุณหภูมิของ CPU เริ่มเพิ่มสูงขึ้นตั้งเวลา 120 – 1080 วินาที และมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 33.4°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของ CPU ในสภาวะปกติ เมื่อเริ่มเปิดโปรแกรม FurMark เพื่อจำลองการทำงานของ CPU ในสภาวะโหลดสูงสุดพบว่าอุณหภูมิของ CPU เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 48.7°C ซึ่งจะถูกนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลของระบบระบายความร้อนด้วยของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อไป

ในแต่ละกรณีการทดลองได้ทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดยได้นำเสนอข้อมูลของอุณหภูมิ CPU อุณหภูมิของของไหลขาเข้า และอุณหภูมิของของไหลขาออกจากกระบวนการระบายความร้อนของ CPU ผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดพบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคืออุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยประมวลผลเริ่มทำงานโดยมีอุณหภูมิของ CPU อยู่ที่ประมาณ 30.5°C ซึ่งไม่แตกต่างกันมากนักใน

สภาวะการทำงานปกติ ในขณะที่อุณหภูมิของของไหลขาออกจากกระบวนการระบายความร้อน CPU จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของของไหลขาเข้าระบบระบายความร้อน CPU ซึ่งได้รับพลังงานความร้อนจากพื้นผิว CPU และถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมผ่านชุดหม้อน้ำระบายความร้อน โดยอุณหภูมิของพื้นผิว CPU ที่ได้จากระบบระบายความร้อนหน่วยประมวลผลกลางคอมพิวเตอร์ด้วยน้ำและด้วยของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ มีค่าอยู่ในช่วง $33 - 34^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการระบายความร้อนพื้นผิว CPU ที่ใช้ของไหลได้ดีกว่าระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว CPU ที่สภาวะการทำงานโหลดสูงสุดในช่วงเวลา 1200 – 2500 วินาที พบว่ามีค่าอยู่ที่ประมาณ $32.7, 32.4, 32.6, 32.9, 33.1$ และ 48.0°C สำหรับ น้ำของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.05\%$, $\phi = 0.1\%$, $\phi = 0.15\%$ และวิธีระบายความร้อนแบบดั้งเดิม ตามลำดับ

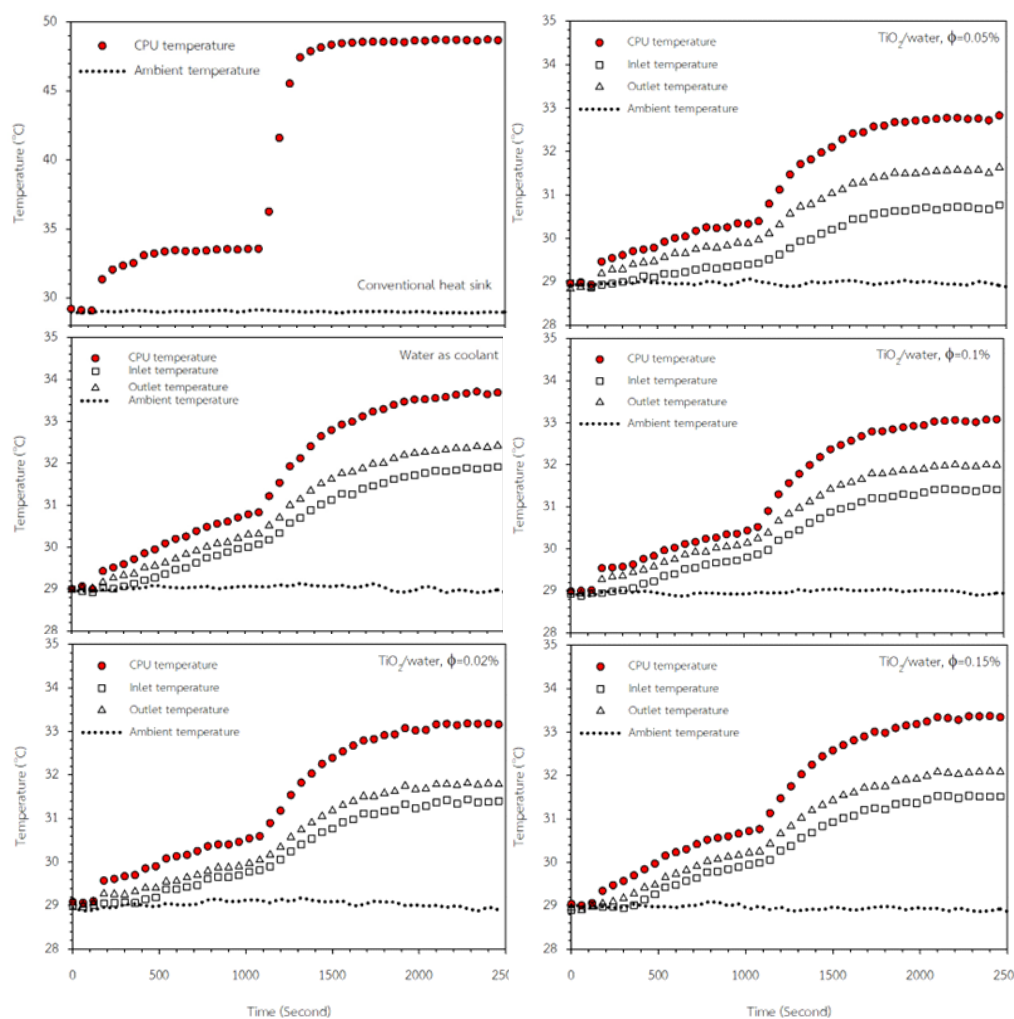


Figure 3 Comparison of CPU, inlet, and outlet temperatures under different cooling conditions.

อิทธิพลของความเข้มข้นอนุภาค $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$

จาก Figure 4 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาค TiO_2 ในระบบระบายความร้อน CPU ประกอบด้วยลักษณะโปรไฟล์อุณหภูมิของ CPU เปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำงาน พบว่าอุณหภูมิของ CPU ที่ได้จากการใช้ไหลของนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักแต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิมพบว่ามีอุณหภูมิ CPU ต่ำกว่าถึง 31.9% และเมื่อเริ่มใช้งานโปรแกรม FurMark เพื่อจำลองสภาวะการทำงานภายใต้โหลดสูงสุดสังเกตได้ว่าตั้งแต่เวลาที่ 1,080 วินาที อุณหภูมิของ CPU มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับระบบระบายความร้อนด้วยของไหลยังคงต่ำกว่าระบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากระบบระบายความร้อนด้วยของไหลมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{water}$ มีความสามารถในการระบายความร้อนสูงกว่ากรณีของไหลน้ำพื้นฐาน อันเป็นผลมาจากการนำความร้อนของของไหลนาโนที่สูงกว่าเกิดการปะทะกันระหว่างอนุภาคนาโน TiO_2 โดยก่อให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาค TiO_2 กับของเหลวได้ดีค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อนจึงดีขึ้น ซึ่งอิทธิพลของความเข้มข้น $\phi = 0.02\%$ ช่วยให้อุณหภูมิของ CPU ลดลง 1.27% เมื่อเทียบกับกรณีของไหลน้ำ ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นเป็น $\phi = 0.02\%$ ส่งผลให้อุณหภูมิของ CPU ลดลงเมื่อเทียบกับกรณี $\phi = 0.02\%$ ประมาณ 1% ในทางกลับกันเมื่อได้เพิ่มความเข้มข้นของอนุภาค TiO_2 เป็น $\phi = 0.1\%$ และ $\phi = 0.12\%$ พบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อน CPU มีค่าลดลง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดบนพื้นผิว CPU สำหรับกรณีใช้น้ำเป็นของไหลพื้นฐาน ของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.05\%$, $\phi = 0.01\%$, $\phi = 0.15\%$ และ กรณีครีระบายความร้อนแบบดั้งเดิม มีค่าเท่ากับ 33.7, 33.2, 32.8, 33.1, 33.4 และ 48.7°C ตามลำดับ โดยกรณีความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสูงสุดซึ่งช่วยให้อุณหภูมิของ CPU ลดลงสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีของไหลน้ำและครีแบบดั้งเดิมถึง 2.6 และ 32.6% ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้น 0.1% และ 0.15% ได้รับอิทธิพลจากค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น ทำให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังแสดงใน Figure 4 (ล่าง) พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อน CPU ที่ใช้ของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.1\%$, $\phi = 0.15\%$ และ น้ำ ถึง 78.8, 27.4, 77.6 และ 82.3% ตามลำดับ

การเกิดตะกอนของอนุภาค TiO_2 ในระบบระบายความร้อน CPU

Figure 5 แสดงตะกอนของอนุภาค TiO_2 ที่เกิดขึ้นภายในระบบระบายความร้อนหน่วยประมวลผลกลางคอมพิวเตอร์หลังจากผ่านการใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลา 12 เดือน a) คือตะกอนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของครีระบายความร้อนในชุดแลกเปลี่ยนความร้อน CPU และ b) คือตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบท่อ ผลที่ได้จากการใช้ของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าอนุภาคนาโน TiO_2 เกิดการอุดตันบริเวณครีระบายความร้อนที่อยู่ในชุดแลกเปลี่ยนความร้อน CPU ส่วนใหญ่ตะกอนที่เกิดขึ้นพบที่บริเวณทางเข้า (ตำแหน่งด้านล่างใน Figure 5a) ระบบระบายความร้อน CPU ในขณะที่การเกิดตะกอนบริเวณทางออกของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นการเกิดตะกอนในระบบท่อของของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ดัง Figure 5b) พบว่าตะกอนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณทางเข้าปั๊มน้ำและภายในท่อส่งของไหลจากการเกาะของอนุภาค TiO_2 แต่บริเวณใบพัดของปั๊มของไหลไม่พบการเกิดตะกอน

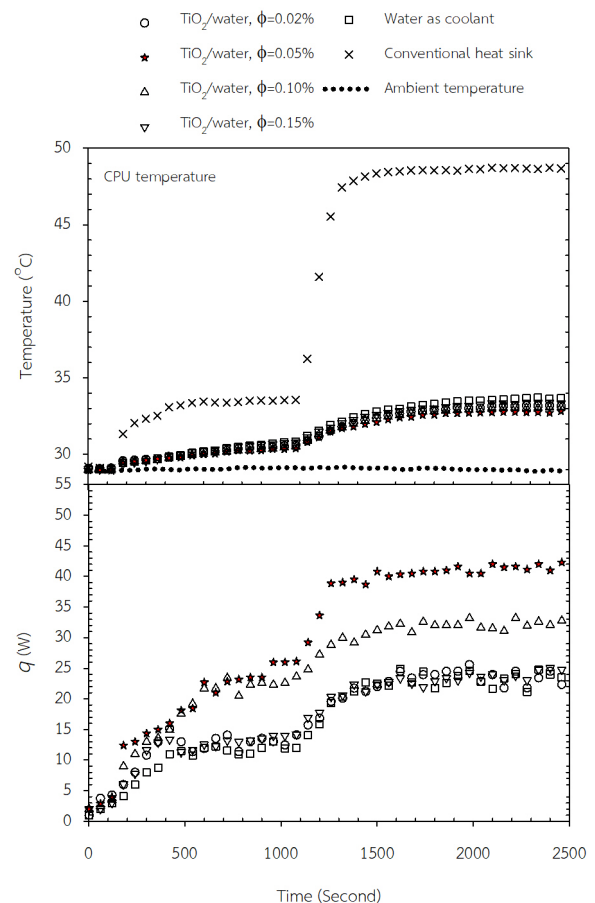
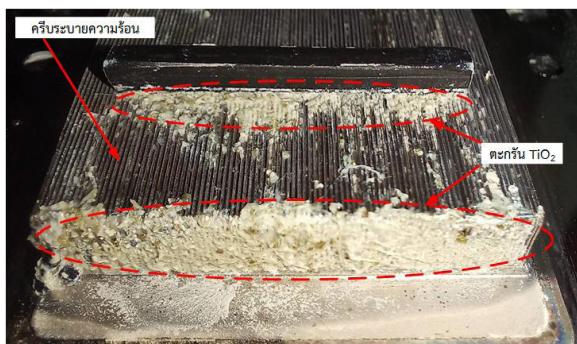
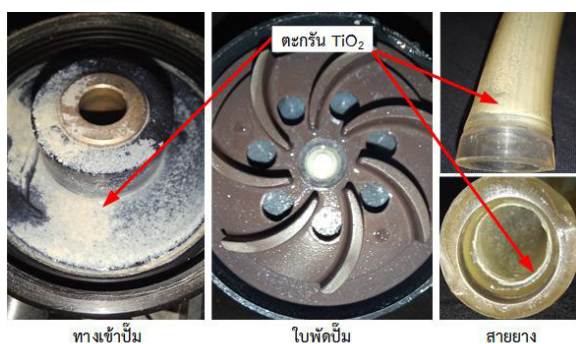


Figure 4 Comparison of CPU temperature and Heat transfer rate under different cooling conditions.

ผลกระทบของการเกิดตะกอนทั้งในพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและภายในระบบท่อต่างๆ เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนลดลงเนื่องจากตะกอนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเหมือนฉนวนความร้อนที่กั้นระหว่างความร้อนกับของไหลที่ไม่สามารถพาความร้อนไปทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมนอกระบบระบายความร้อน CPU ได้ ซึ่งเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองในด้านอุณหภูมิของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเดือนที่ผ่านการใช้งาน ในขณะที่การเกิดตะกอนในระบบท่อต่างๆทำให้ความสามารถเด่นด้านการนำความร้อนของอนุภาคนาโน TiO_2 ในน้ำลดลงเสมือนใช้ของไหลน้ำพื้นฐานเป็นสารทำงาน แต่ผลกระทบด้านความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในระบบท่อส่งผลให้อัตราการไหลของของไหลในระบบลดลง ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจึงลดลงด้วยเช่นกัน



a) Photograph of CPU



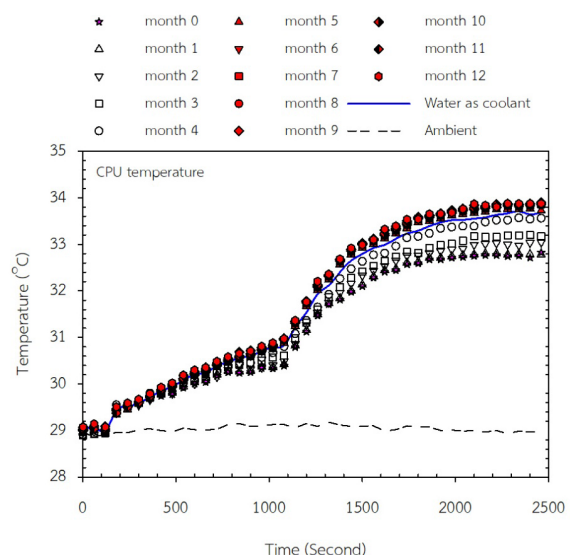
b) Photograph of piping

Figure 5 Fouling formation in the CPU cooling system.

ผลกระทบของตะกอนของอนุภาค TiO_2 ต่อระบบระบายความร้อน CPU

Figure 6 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิของ CPU ที่ได้ทดสอบการใช้งานแบบต่อเนื่องซึ่งได้บันทึกผลของอุณหภูมิ CPU ในแต่ละเดือนรวมทั้งหมด 12 เดือน เพื่อศึกษาถึงผล

กระทบของตะกอนที่เกิดจากอนุภาค TiO_2 โดยผลที่ได้จากการทดลองนี้ได้ใช้ของไหล TiO_2 /น้ำ ที่ความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ เป็นของไหลทดสอบ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของ CPU มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการใช้งานในแต่ละเดือน โดยในช่วงเดือนที่ 1 หลังจากการใช้งานต่อเนื่องยังคงมีโปรไฟล์ของอุณหภูมิของ CPU ใกล้เคียงกับกรณีที่ระบบเริ่มต้นใช้งานของไหล TiO_2 /น้ำ (Month 0) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการระบายความร้อนที่ยังเท่าเดิม ในขณะที่การใช้งานของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ในช่วงเดือนที่ 2 และ 3 พบว่ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่เริ่มต้นใช้งานของไหล TiO_2 /น้ำ ในเดือนที่ 0 แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเดือนที่ 4 หลังจากการใช้งานพบว่า โปรไฟล์อุณหภูมิของ CPU มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้โปรไฟล์อุณหภูมิของ CPU ที่ได้จากการใช้ของไหลน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน TiO_2 /น้ำ ลดลงตามการลดลงของอนุภาค TiO_2 ในของไหลน้ำอันเนื่องมาจากการเกิดตะกอนตามพื้นผิวต่างๆ ในระบบระบายความร้อนที่ พฤติกรรมการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนจึงคล้ายและใกล้เคียงกัน อุณหภูมิ CPU ที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือน มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่เริ่มต้นใช้งานในเดือนที่ 0 ประมาณ 0.08, 0.77, 1.28 และ 2.38% ตามลำดับ โดยอุณหภูมิ CPU ที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 4 เดือน ยังต่ำกว่ากรณีที่ของไหลน้ำอยู่ประมาณ 0.37%

Figure 6 Variation in CPU temperature over 12 months of TiO_2 /water nanofluid coolant usage.

เมื่อพิจารณาถึงผลของการเกิดตะกอนของอนุภาค TiO_2 ที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 เดือน เป็นต้นไปพบว่า

อุณหภูมิของ CPU มีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนและสูงกว่ากรณีของไหลน้ำพื้นฐานประมาณ 0.5% ซึ่งเป็นผลมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบระบายความร้อนเป็นตัวต้านทานการไหลของความร้อนระหว่างพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหล ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง

Figure 7 แสดงอัตราส่วนอุณหภูมิของ CPU สำหรับของไหล $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ($\phi = 0.05\%$) ตามระยะเวลาผ่านการใช้งานในแต่ละเดือน โดยแกนตั้งด้านซ้ายเป็นการเปรียบเทียบกับกรณีเริ่มต้นใช้งานของไหล $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ (Month 0) ในขณะที่แกนตั้งด้านขวาเป็นการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของ CPU ที่ได้จากการใช้น้ำเป็นของไหลพื้นฐาน ผลที่ได้พบว่าการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อนของ CPU มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการใช้งานซึ่งอัตราการเกิดตะกอนมีค่าสูงในช่วง 1 – 5 เดือน หลังจากผ่านการใช้งานโดยสังเกตได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ CPU หลังจากผ่านการใช้งานตั้งแต่เดือนที่ 6 เป็นต้นไปพบว่าอัตราการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อนลดลงซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ CPU ลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของการเกิดตะกอนเปรียบเทียบกับกรณีของไหลน้ำพบว่า ความสามารถในการระบายความร้อนของระบบระบายความร้อนที่ใช้ของไหล $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 5 เดือน จะมีค่าต่ำกว่ากรณีของไหลน้ำอันเกิดจากตะกอนที่สะสมภายในระบบระบายความร้อน ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง อุณหภูมิของ CPU ที่ได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบระบายความร้อน CPU ที่ใช้ของไหล $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ เป็นของไหลทำงานควรมีระยะเวลาในการใช้งานไม่เกิน 5 เดือน

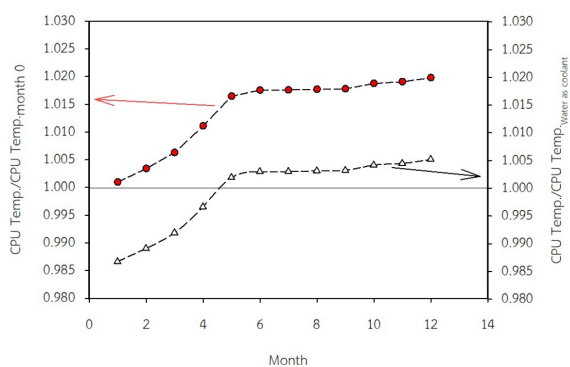


Figure 7 Ratio of CPU temperature over 12 months of $\text{TiO}_2/\text{water}$ nanofluid coolant usage.

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลกระทบของการเกิดตะกอนในระบบระบายความร้อน CPU สามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การใช้ของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ เป็นสารทำงานสามารถช่วยลดอุณหภูมิของ CPU ลงจากกรณีครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิมถึง 15°C คิดเป็น 31.25% 2) กรณีของไหลนาโน $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ที่ $\phi = 0.05\%$ ให้ค่าอุณหภูมิของ CPU ต่ำกว่ากรณี $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.1\%$, $\phi = 0.15\%$ และน้ำ ประมาณ 1%, 0.1%, 0.15% และ 2.6% อีกทั้งเมื่อเทียบกับกรณีครีบบแบบดั้งเดิมสามารถช่วยลดอุณหภูมิได้สูงถึง 32.6% ซึ่งที่ $\phi = 0.05\%$ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดโดยสูงกว่า $\phi = 0.02\%$, $\phi = 0.1\%$, $\phi = 0.15\%$ และ น้ำ ถึง 78.8, 27.4, 77.6 และ 82.3% ตามลำดับ และ 3) การเกิดตะกอนของอนุภาค TiO_2 ต่อระบบระบายความร้อน CPU ผ่านการใช้งานต่อเนื่องพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งระบบระบายความร้อน CPU ที่ใช้ของไหล $\text{TiO}_2/\text{น้ำ}$ ความเข้มข้น $\phi = 0.05\%$ ควรมีระยะเวลาการใช้งานไม่เกิน 5 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีและสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยปีงบประมาณ 2567 โครงการเลขที่ 4694070

เอกสารอ้างอิง

- คมกฤษณ์ ชัยโย. (2567). การจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและการไหลด้วยการพุ่งชนของของไหลนาโนบนแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีครีบบระบายความร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 43(2), 141–151.
- สหสวัต แซวรัมย์. (2564). การทำนายสมบัติของของไหลไฮบริดนาโนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ในการถ่ายโอนความร้อน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/5293>
- Abbasian Arani, A. A., & Amani, J. (2013). Experimental investigation of diameter effect on heat transfer and pressure drop of $\text{TiO}_2/\text{water}$ nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 520–533. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.012>

- Ali, A. R. I., & Salam, B. (2020). A review on nanofluid: Preparation, stability, thermophysical properties, heat transfer characteristics and application. *SN Applied Sciences*, 2, Article 1636. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03427-1>
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2009). Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂–water nanofluid in a double tube counter flow heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 2059–2067. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.023>
- Einstein, A. (1911). Berichtigung zu meiner Arbeit: “Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen”. *Annalen der Physik*, 339(3), 591–592. <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>
- Khedkar, R. S., Sonawane, S. S., & Wasewar, K. L. (2014). Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO₂–water based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.002>
- Liu, Q., Lv, C., Wen, M., & Wang, Y. (2025). Numerical investigation on the nanofluid heat transfer enhancement in ground heat exchanger. *Renewable Energy*, 244, Article 123164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.123164>
- Ma, H. B., Wilson, C., Borgmeyer, B., Park, K., Yu, Q., Choi, S. U. S., & Tirumala, M. (2006). Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe. *Applied Physics Letters*, 88(14), Article 143116. <https://doi.org/10.1063/1.2192971>
- Maxwell, J. C. (1954). *A treatise on electricity and magnetism*. Dover. (Original work published 1873)
- Naphon, P., & Wongwises, S. (2010). Investigation on the jet liquid impingement heat transfer for the central processing unit of personal computers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(7), 822–826. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.05.004>