

國立臺灣師範大學科技與工程學院工業教育學系

碩士論文

Department of Industrial Education

College of Technology and Engineering

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

石墨烯奈米流體應用於電子晶片散熱之研究

Research on The Application of Graphene Nanofluids to

Heat Dissipation for Electronic Chips

黃家慶

Huang, Chia-Cing

指導教授：鄧敦平 博士

Advisor : Teng, Tun-Ping, Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July 2022

## 謝辭

就讀碩士班的兩年時間在轉眼間就過去了，在兩年學術研究的過程中，首先必須感謝的是我的指導教授鄧敦平教授，在指導研究方式與學術知識上花費許多時間，提供許多有益的資源與指導，並且還時常交流時事相關的話題，師生關係亦師亦友相處十分融洽，我感到非常榮幸能夠加入老師的研究團隊，同時也感謝我的口試委員尤尚邦助理教授與程金保教授，針對我的論文給予許多指教與專業意見，種種的一切才能夠造就最後完成我的碩士論文並且使其更佳的完善。

感謝研究室的同學們在兩年間給予的支持與幫助，謝謝祥楷、秉勳一起待在地下室研究課業，閒暇時聊天抒發壓力，參加兩年的研討會增廣自身的知識；同時也特別謝謝祥楷分擔研究室事務，讓作為研究助理的工作負擔有人能夠一起分攤。

感謝車能組的同學們，奕亭、家銘、星諺及顯皓，在課業繁重時互相激勵、苦中作樂，在偶爾感到研究生生活煩悶的同時能夠有人可以抒發情緒；感謝研究所期間遇到的所有人，因為碩士生涯有大家的陪伴，才能使我人生增添許多美好的回憶。

感謝助教們紫璿、素菁、書媛及巍芬，幫忙審核論文或是閒暇時都能與助教聊天，謝謝一路上所有幫助過我的人，有大家的陪伴才能順利完成碩士學位。最後感謝我的家人，支持我讀碩士的決定，讓我能夠沒有顧慮的完成我的學業，感謝我的父母包容我在求學過程中造成的麻煩，讓我深刻的體會到無論遭遇多大的困難，家永遠都是我的避風港。

## 摘要

論文名稱：石墨烯奈米流體應用於電子晶片散熱之研究 頁 數：90 頁

校 名：國立臺灣師範大學

系 所 名：工業教育學系碩士班-能源應用與車輛技術組

畢業時間：111 學年度第 2 學期 學 位：碩 士

研 究 生：黃家慶 指 導 教 授：鄧敦平

**關 鍵 詞**：分散劑、石墨烯奈米流體、熱交換量、雷諾數、水冷式系統

本研究因應電子晶片散熱需求越來越高而開發石墨烯奈米流體 (GNNF) 替代水作為水冷式系統的工作流體以提供更佳的散熱性能。本研究首先利用球磨機降低石墨烯 (GN) 的粒徑並且將其配製為石墨烯奈米流體 (GNNF)，並使用十二烷基硫酸鈉 (SDS) 做為分散劑，且 SDS 與 GN 濃度呈現 1:2 時會使 GNNF 具有最佳的穩定性。此外，諸如 GNNF 的密度、黏度、比熱與熱傳導係數等基本性質均進行量測以評估 GNNF 在熱交換領域應用的可行性。最後實際將 GNNF 應用於中央處理器 (CPU) 水冷系統進行散熱性能實驗以評估 GNNF 的熱交換性能。散熱性能實驗的實驗參數分別為四個 GNNF 濃度 (0、0.05、0.1、0.2 wt%)、三個不同的加熱瓦數 (50、100、150 W) 以及三個不同的流量 (2、3.5、5 LPM)。研究結果顯示環境溫度 25°C 時，GNNF 具有最佳散熱能力的濃度為 0.05 wt%，並且在高流量與低瓦數的參數下有最高的熱交換量提升率。0.05 wt% GNNF 在 50 W/5 LPM 的熱交換量提升率比水高約 13.9%。在環境溫度 32°C 時，GNNF 具有最佳散熱能力的濃度為 0.1 wt%。0.1 wt% GNNF 在 50 W/5 LPM 的熱交換量提升率比水高約 63.1%。

# Abstract

Title : Research on The Application of Graphene Nanofluids to Heat Dissipation  
for Electronic Chips

Pages : 90

School : National Taiwan Normal University

Department : Department of Industrial Education

Time : June, 2022

Degree : Master

Researcher : Huang, Chia-Cing

Advisor : Teng, Tun-Ping

*Keywords* : Dispersant; Graphene nanofluid ( GNNF ); Heat exchange capacity,  
Reynolds number ( Re ) ; Water-cooled system

In response to the increasing heat dissipation demand of electronic chips, this study developed graphene nanofluid (GNNF) to replace water as the working fluid of a water-cooled system and provide better heat dissipation performance. In this study, the particle size of graphene (GN) was reduced by a ball miller and formulated into graphene nanofluid (GNNF), and sodium dodecyl sulfate (SDS) was used as a dispersant. The concentrations of SDS and GN showed that 1:2 would give GNNF the best stability. In addition, fundamental characteristics, such as density, viscosity, specific heat, and thermal conductivity of GNNF, were measured to evaluate the feasibility of GNNF application in heat exchange. Finally, GNNF was applied to the water-cooled system of the central processing unit (CPU) to conduct heat dissipation performance experiments in order to evaluate the heat exchange performance of GNNF. The experimental parameters of the heat dissipation performance experiment are four GNNF concentrations (0, 0.05, 0.1, and 0.2 wt%), three heating powers (50, 100, 150 W), and three

flow rates (2, 3.5, and 5 LPM). The results show that when the ambient temperature is at 25°C, the concentration of GNNF with the best heat dissipation capacity is 0.05 wt%, having the highest increasing ratio of heat exchange under the parameters of high flow rate and low heating power. The increasing heat exchange ratio for 0.05 wt% GNNF at 50 W/5 LPM is about 13.9% higher than that of water. At an ambient temperature of 32°C, the concentration of GNNF with the best heat dissipation capability is 0.1 wt%. The increasing heat exchange ratio for 0.1 wt% GNNF at 50 W/5 LPM is about 63.1% higher than that of water. Further, 0.05 wt% and 0.1 wt% GNNF can improve the system efficiency constant (SEF) by 18.2% and 59.1% at the ambient temperature of 25°C and 32°C, respectively.



# 目次

|                      |      |
|----------------------|------|
| 謝辭.....              | i    |
| 摘要.....              | ii   |
| Abstract.....        | iii  |
| 目次.....              | v    |
| 表次.....              | vii  |
| 圖次.....              | viii |
| 第一章 緒論.....          | 1    |
| 1.1 研究背景與動機.....     | 1    |
| 1.2 研究目的.....        | 2    |
| 1.3 研究流程.....        | 3    |
| 1.4 論文架構.....        | 4    |
| 1.5 文獻回顧.....        | 5    |
| 第二章 理論分析與文獻探討.....   | 7    |
| 2.1 奈米材料與奈米流體.....   | 7    |
| 2.2 奈米流體的製備.....     | 8    |
| 2.3 奈米流體的穩定性.....    | 11   |
| 2.4 奈米流體之熱交換應用.....  | 14   |
| 2.5 奈米流體之基本性質.....   | 15   |
| 2.6 中央處理器之熱設計功耗..... | 17   |
| 第三章 實驗設計.....        | 19   |
| 3.1 實驗系統.....        | 20   |
| 3.2 實驗方法與步驟.....     | 26   |
| 3.3 實驗流體配製.....      | 27   |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 3.4 基本性質量測實驗.....  | 31 |
| 3.5 水冷熱交換實驗.....   | 36 |
| 3.6 數據分析.....      | 36 |
| 3.7 不確定性分析.....    | 39 |
| 第四章 結果與討論.....     | 40 |
| 4.1 奈米流體配製結果.....  | 40 |
| 4.2 基本性質量測結果.....  | 48 |
| 4.3 熱流性質結果分析.....  | 56 |
| 4.4 水冷熱交換實驗結果..... | 59 |
| 第五章 結論與建議.....     | 76 |
| 5.1 結論.....        | 76 |
| 5.2 建議.....        | 78 |
| 參考文獻.....          | 80 |
| 符號釋義.....          | 88 |
| 作者簡介.....          | 90 |

## 表次

|   |    |
|---|----|
| 表 2.1 一階與二階合成法優缺點比較.....                  | 10 |
| 表 2.2 奈米流體應用相關文獻.....                     | 14 |
| 表 2.3 各品牌 CPU 之 TDP .....                 | 17 |
| 表 3.1 各元件規格表.....                         | 23 |
| 表 3.2 各量測點代號表.....                        | 25 |
| 表 3.3 各量測點代號表.....                        | 28 |
| 表 3.4 各項目之不確定性分析.....                     | 39 |
| 表 4.1 各濃度 GNNF 密度回歸方程式.....               | 48 |
| 表 4.2 各濃度 GNNF 黏度回歸方程式.....               | 50 |
| 表 4.3 各濃度 GNNF 比熱回歸方程式.....               | 53 |
| 表 4.4 各濃度 GNNF 熱傳導係數回歸方程式.....            | 54 |
| 表 4.5 各濃度 GNNF 之紐塞數.....                  | 58 |
| 表 4.6 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (2 LPM) .....   | 60 |
| 表 4.7 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (3.5 LPM) ..... | 60 |
| 表 4.8 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (5 LPM) .....   | 61 |
| 表 4.9 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (2 LPM) .....      | 73 |
| 表 4.10 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (3.5 LPM) .....   | 73 |
| 表 4.11 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (5 LPM) .....     | 74 |

## 圖次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 圖 1.1 研究流程圖.....                     | 3  |
| 圖 2.1 一階合成法示意圖.....                  | 8  |
| 圖 2.2 二階合成法示意圖.....                  | 9  |
| 圖 3.1 實驗架構圖.....                     | 19 |
| 圖 3.2 PID 控制器.....                   | 20 |
| 圖 3.3 環境控制室平面圖.....                  | 21 |
| 圖 3.4 水冷散熱系統元件圖.....                 | 22 |
| 圖 3.5 水冷系統圖.....                     | 24 |
| 圖 3.6 實驗步驟架構圖.....                   | 26 |
| 圖 3.7 石墨烯粉末.....                     | 27 |
| 圖 3.8 石墨烯顆粒於 SEM 下之影像.....           | 28 |
| 圖 3.9 本研究使用之量測儀器.....                | 35 |
| 圖 4.1 分散劑決定實驗靜態靜置法時長.....            | 41 |
| 圖 4.2 分散劑濃度配比實驗靜態靜置時長.....           | 43 |
| 圖 4.3 各濃度樣本吸收值變化圖.....               | 45 |
| 圖 4.4 各濃度樣本吸收值差異百分比.....             | 46 |
| 圖 4.5 各濃度 GNNF 之 Zeta potential..... | 47 |
| 圖 4.6 GNNF 在不同溫度下的密度.....            | 49 |
| 圖 4.7 GNNF 在不同溫度下的黏度.....            | 51 |
| 圖 4.8 GNNF 在不同溫度下的比熱.....            | 53 |
| 圖 4.9 GNNF 在不同溫度下的熱傳導係數.....         | 55 |
| 圖 4.10 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (50 W).....   | 56 |
| 圖 4.11 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (100 W).....  | 57 |
| 圖 4.12 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (150 W).....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 4. 13 GNNF 於 25°C 的 $R_{Qex}$ .....             | 63 |
| 圖 4. 14 GNNF 於 32°C 的 $R_{Qex}$ .....             | 64 |
| 圖 4. 15 GNNF 在 25°C 下的 $R_{\eta}$ (2 LPM) .....   | 65 |
| 圖 4. 16 GNNF 在 25°C 下的 $R_{\eta}$ (3.5 LPM) ..... | 66 |
| 圖 4. 17 GNNF 在 25°C 下的 $R_{\eta}$ (5 LPM) .....   | 66 |
| 圖 4. 18 GNNF 在 32°C 下的 $R_{\eta}$ (2 LPM) .....   | 67 |
| 圖 4. 19 GNNF 在 32°C 下的 $R_{\eta}$ (3.5 LPM) ..... | 67 |
| 圖 4. 20 GNNF 在 32°C 下的 $R_{\eta}$ (5 LPM) .....   | 68 |
| 圖 4. 21 GNNF 於 25°C 的 SEF (2 LPM) .....           | 70 |
| 圖 4. 22 GNNF 於 25°C 的 SEF (3.5 LPM) .....         | 70 |
| 圖 4. 23 GNNF 於 25°C 的 SEF (5 LPM) .....           | 71 |
| 圖 4. 24 GNNF 於 32°C 的 SEF (2 LPM) .....           | 71 |
| 圖 4. 25 GNNF 於 32°C 的 SEF (3.5 LPM) .....         | 72 |
| 圖 4. 26 GNNF 於 32°C 的 SEF (5 LPM) .....           | 72 |

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

近年來在各工業領域中，提升工業儀器的廢熱處理效率是重要的課題，因應地球暖化的現況，如何在節約能源的前提下獲取最佳的效率是各領域亟需尋求的平衡點，傳統的工作流體經常因其不佳的熱流性質為人所詬病，因此在傳統的工作流體中添加奈米顆粒是近年來一個重要的研究方向，添加奈米顆粒後的傳統工作流體具有較佳的熱傳導性質並且可以提升熱交換上的表現，能夠提升工業上的廢熱回收效率作為傳統工作流體的替代方案。隨著科技的日新月異，電子系統在性能提升的同時也意味著更高的散熱需求，比起使用傳統的氣冷散熱系統，水冷散熱系統因為工作流體的性值通常具有更佳的散熱能力而被廣泛使用，在熱交換器發展成熟的情況之下，改善傳統工作流體的散熱效果以利適應現今越來越高的熱負載則成為一種必然的趨勢。

奈米流體應用中的首要之務是確保流體的穩定性，為了維持奈米流體良好的懸浮性添加分散劑至流體中是一種常見的手段，適當的添加分散劑可以降低奈米顆粒在基礎流體中的表面張力，進而提高顆粒的分散性。然而添加分散劑有機會導致大量的起泡與酸鹼值的影響，抑或是提高流體的黏度導致製成的奈米流體有較低的熱流性質。因此如何在添加分散劑的同時保有與原先相同優異的熱交換性能是擴大奈米流體在各領域中能夠被充分利用的重點研究。

利用不同的工作流體進行散熱是常見的手段，奈米流體的應用也愈發廣泛，因此如果在環境友善的前提下妥善的利用奈米流體獲取更佳的工作效率則是現今許多工業工程領域的課題，因此本研究擬以奈米石墨烯粉末添加至水中製成 GNNF，應用於模擬電腦 CPU 之熱負載並進行散熱實驗，

探討 GNNF 的基礎性質與應用於電子晶片散熱系統之可能性。

## 1.2 研究目的

本研究首先配製 GNNF，並探討分散劑對其穩定性的影響，針對奈米流體的多項基本性質進行量測後，將奈米流體使用在模擬電腦 CPU 之水冷系統上進行熱交換散熱實驗，最後研究奈米流體的熱流性質作為未來熱交換領域 GNNF 應用的參考。因此本研究的研究目的如下所述：

1. 配製石墨烯奈米流體與分散劑選用實驗。

使用機械剝離法製成的 GN 顆粒配置 GNNF，並且考量到奈米流體重要的穩定性，選擇對流體穩定性有最佳提升的分散劑添加法，選用多種常見的分散劑並且觀察各分散劑在靜置法實驗下的穩定性，選出最佳的分散劑後進行後續的實驗。

2. GNNF 穩定性實驗與各項基本性質量測。

配置完成的 GNNF 首先進行靜置法實驗確認其穩定性，並且輔以吸收光譜實驗與 Zeta Potential 量測得出最佳的奈米顆粒與分散劑添加比例，並且針對配置完成的各濃度實驗流體進行基本性質的量測方便後續的實驗計算與分析。

3. 模擬 CPU 散熱之熱交換實驗與熱流性質分析。

將製備完成的各濃度實驗流體應用於架設完成的模擬 CPU 水冷系統中進行熱交換實驗，並且利用可程式電源供應器模擬穩態與暫態之負載情況，最後利用實驗的各項量測數據計算常見的熱流性質與評估 GNNF 應用於水冷系統之效益。

### 1.3 研究流程

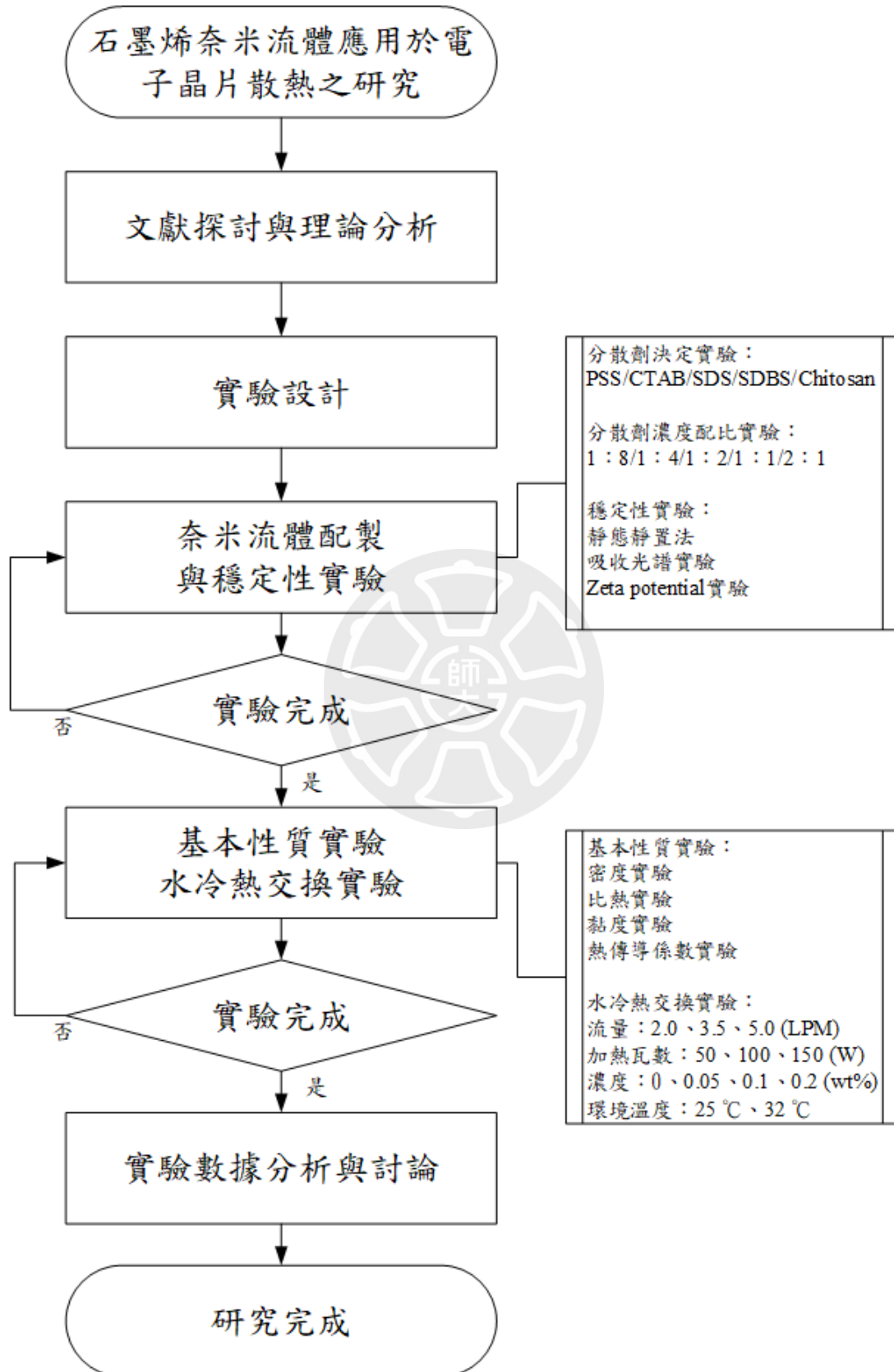


圖 1.1 研究流程圖

## 1.4 論文架構

本研究分為五個章節內容如下所述：

第一章為緒論，本章節以研究目的與背景為著眼點，描述現今工業現況與科技趨勢所需作為研究的有力支柱，進一步了解到工業在熱處理面向亟需的進展，並且針對奈米流體在新興產業中被廣泛使用的事實，將奈米流體能為工業與電子業散熱帶來的效益做全面性的審視。

第二章為理論分析與文獻探討，本章歸納奈米流體相關的文獻，從奈米材料與奈米流體的認識到奈米流體製備的相關研究。再者奈米流體穩定性的維持與分散劑的選用整理，乃至奈米流體的應用與實際使用後的熱流性質分析，針對奈米流體從製備到應用的完整流程做總體的文獻探討分析，找尋本研究適合的方法、工具與理論依據。

第三章為實驗設計，本章以流程圖與系統圖將實驗的內容做詳細的分段敘述，實驗主要分為三個部分：第一部分為配製 GNNF 並且針對奈米流體的穩定性做改善與檢測，完成分散劑的添加與配比的確認後使用相關儀器進行懸浮性能的測試；第二部分為實驗流體的基本性質量測，針對散熱實驗上常見的實驗參數進行相關量測，以利後續實驗完成後的數據分析與計算；第三部分為實際的熱交換實驗，將製備完成的奈米流體放入架設好的模擬 CPU 散熱系統，以確認 GNNF 作為散熱流體的可能性與實際效益提升。

第四章為結果與討論，本章節將本研究製備的 GNNF 以及其後續的實驗利用結果，做相關數據的分析與討論。

第五章為結論與未來展望，本章節將針對上述的研究內容進行統括性的結論，並且探討研究在未來的可能性。

## 1.5 文獻回顧

本研究主要利用 GNNF 進行熱交換實驗，因此本章節主要針對熱交換相關的文獻進行簡述，從熱交換或是冷卻研究領域乃至奈米流體分散相關的實驗結果都是對於本研究來說重要的研究成果，近年重要的相關文獻如下所述：

2020 年 Li et al. [1]利用  $\text{TiO}_2$  與 Ag 的混合奈米流體作為冷卻介質應用於生態友好的熱能儲存系統，並且在最後獲得了性能上的提升，相較於一般的冷卻介質，奈米流體的應用在熱傳導係數上有 42.17%的提升，又在最高溫的方面也有約  $5.4^\circ\text{C}$  的溫降相當於 63.01%的下降幅度。

2021 年 Balaji et al. [2]使用石墨烯片 (GN) 與多壁奈米碳管製備水基奈米流體並且針對其提升的性質進行探討，研究最後發現奈米流體相較於水在熱傳導係數上有 25%的提升並且在應用於熱交換時有高達 85%的效率提升，同時讓散熱器的最高溫有  $12^\circ\text{C}$  的溫降。

2021 年 Selvaraj 和 Krishnan [3]利用石墨烯與銀的混合奈米流體進行電子系統散熱相關的模擬實驗，實驗結果顯示相較於傳統的流體在熱傳導係數上有 46%的提升，系統核心的溫度則有 16%的下降並且流體的紐塞數 (Nusselt number, Nu) 有 37%的提升對熱交換上具有重要的提升意義。

2021 年 Zheng et al. [4]探討了超音波處理對於石墨烯奈米流體的影響，超音波被認為對石墨烯奈米流體的分散具有相當大的幫助，實驗結果顯示二階合成法製備完成的石墨烯奈米流體在低振幅並且長時間的超音波震盪下，相比高振幅短時間的震盪對流體本身維持懸浮穩定性有更多的有幫助。

2022 年 Ho et al. [5]針對包含相變材料 (phase change material, PCM) 與石墨烯的混合奈米流體進行散熱表現相關的研究，實驗的結果顯示奈米流體在熱交換系率、雷諾數上皆有一定的提升幅度，添加石墨烯的流體相

較於僅添加相變材料的有約 2.9%的熱交換效率提升。

2022 年 Dayou et al. [6]主要探討石墨烯與多壁奈米碳管的奈米流體應用於二重管熱交換器的性能提升，實驗結果發現在低濃度與低流量的實驗參數下，石墨烯奈米流體具有最佳的熱交換性能，然而多壁奈米碳管則是在較高的流量與濃度時具有最佳的熱交換性能，因此可以得知奈米顆粒的形貌將會影響奈米流體應用在不同領域上時的性能提升量。

2022 年 Zhou et al. [7]將石墨烯添加至 R141b 中製備出石墨烯奈米流體並且應用於迷你熱交換器上探討其熱交換性能的提升，從實驗結果顯示出添加 0.025 wt%石墨烯後的 R141b 流體在熱交換性能上有 75%的提升，並且添加濃度 0.035 wt%的樣本則具有最低的壓降。

2022 年 Gao et al. [8]研究石墨烯奈米冰漿在水平圓管中的熱交換與流體性質，從實驗結過中可以看到相較於冰漿在壓降上有 5%的提升，相對於水則是 25%，在熱交換性能的部分則有分別 9%與 15%的提升幅度，並且可以發現越高的流體濃度則會有越高的壓降與比熱容。

## 第二章 理論分析與文獻探討

### 2.1 奈米材料與奈米流體

在傳統工作流體中加入奈米材料可以製備奈米流體，奈米流體於熱交換領域有優異的提升效果是長久以來許多研究達成的共識，許多的研究指出奈米流體具有更優異的熱交換性質，其中又以熱傳導係數有最顯著的提升，在熱管理的領域中奈米流體扮演非常重要的角色，利用奈米顆粒較佳的熱流性質，添加至工作流體中提高整體的性能。

#### 2.1.1 石墨烯奈米材料與奈米流體

GN 作為奈米材料具有傑出的熱電性質是眾所周知的，在現今的科學領域中 GN 佔有極高的應用比例，從太空工業到微電子科技甚至是能源管理領域都被廣泛的使用，GN 同時也是許多材料的基礎型態，一維的奈米碳管可以藉由將 GN 折疊成圓柱來製成，抑或是將多層石墨烯堆疊可以得到石墨等等，有關 GN 的歷史可以追溯到 1859 年，Brodi 等人首次嘗試合成 GN[9]，然而相關的研究，是直到 2004 年 Novoselov 等人成功合成獨立的石墨烯片後才有重大的突破[10]。GN 的原子晶格為蜂巢狀結構，厚度僅一個碳原子厚，每個碳原子都與其他三個碳原子以共價鍵的形式緊緊結合，且晶格中的每個原子都具有一個  $sp^2$  混成結構[11, 12]，且片狀平面之間形成垂直軌道式的排列，造就 GN 半導體與半金屬的特質，同時也使之不存在能隙並且在傳導帶與價帶間不具有重疊的現象，也因為這樣的現象使 GN 在所有已知的材料中具有最高的載子遷移率其值為  $200000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$ [13, 14]。除了優秀的電子性質之外，GN 同樣擁有傑出的熱性值，從文獻中可以看到最高的熱傳導係數為  $5000 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ，從上述各種文獻中都可以得出其擁有傑出特性的結論，顯示了眾多研究者對這項新興材料的濃厚

興趣。

## 2.2 奈米流體的製備

一般來說奈米流體的製備需要謹慎的選擇使用的奈米材料，適當且符合需求的材料才能使奈米流體扮演良好的角色，在判別奈米材料的標準中又以介電係數與熱傳導率為最常被考慮的材料性質，因此在製備奈米流體前應該妥善的分析奈米材料的各項性質，有助於提升製備出的奈米流體的介電係數與熱傳導係數。奈米材料又分為三個種類，分別為導體材料（奈米銅、奈米銀）、半導體材料（二氧化鈦、二氧化銅）與絕緣材料（氮化硼、二氧化矽），而製備奈體流體的方法又分為一階合成法與二階合成法，合成法的差異如下所述：

### 2.2.1 一階合成法

在一階合成法中，奈米顆粒的製備與分散將同時進行，使用不同的分散手段保持奈米流體的穩定性且同時降低奈米顆粒的團聚[15]，然而一階合成法因為其進行過程的不易而有高成本的缺點，且無法進行大量的製造。一階合成法的概念如圖 2.1 所示。

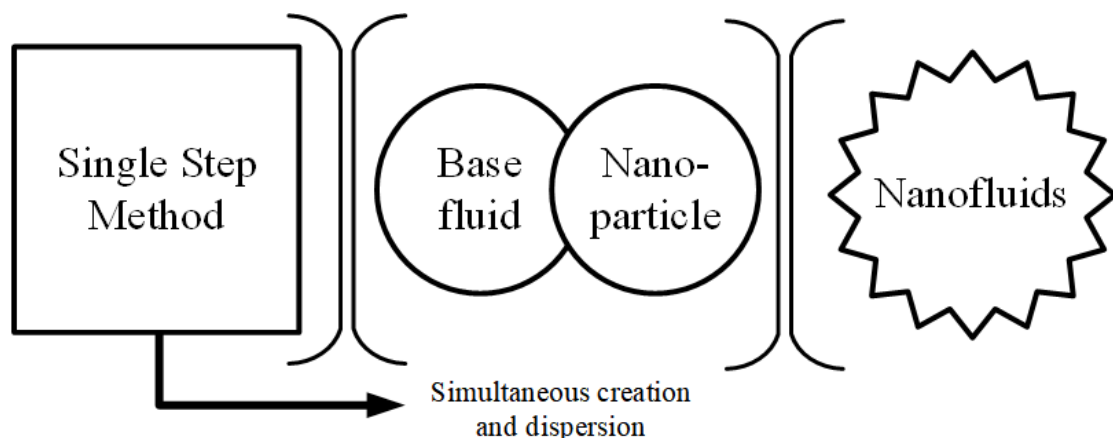


圖 2.1 一階合成法示意圖

### 2.2.2 二階合成法

二階合成法一般來說會先使用化學或是物理方法初步製備奈米粒子，再將初始製備出的奈米粒子加到傳統工作流體或是載體流體中，並且利用球磨法、高剪切力混合、超音波震盪或是電磁攪拌等等方法維持並且提升奈米流體的穩定性同時降低奈米粒子在溶液中團聚的情形，二階合成法的製備流程較為繁雜且瑣碎，但因其具有低成本的特性且可以進行大量的流體製備，許多研究者較偏好使用二階合成法進行奈米流體的製備。在二階合成法中使用分散劑或是界面活性劑也是常見用來提升流體穩定性的方式[16,17]，常見的分散劑有聚苯乙烯磺酸鈉（polystyrene sulfonate, SDS）、油酸（oleic acid）、甲聚醣（chitosan）等等。二階合成法的概念如圖 2.2 所示。

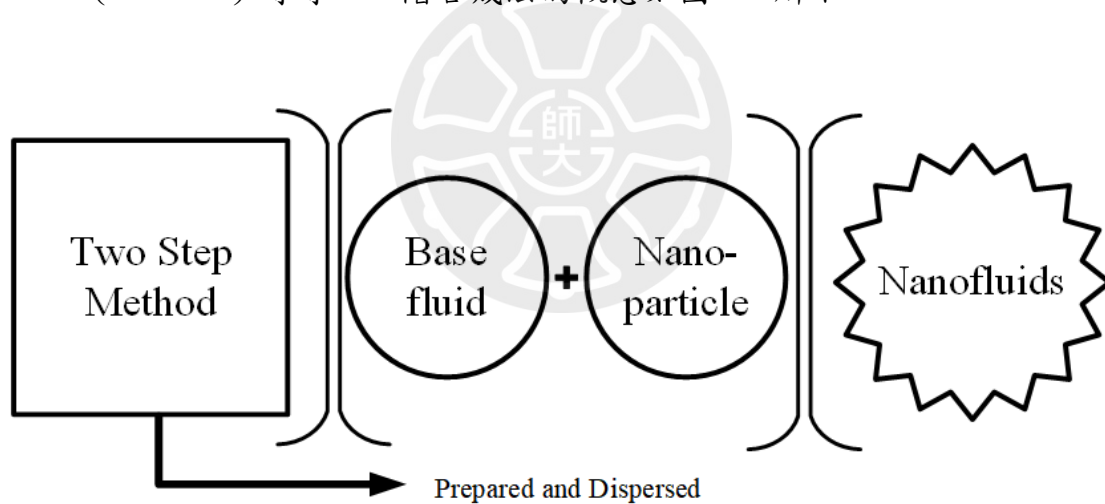


圖 2.2 二階合成法示意圖

表 2.1 一階與二階合成法優缺點比較

|    | 一階合成法  | 二階合成法  |
|----|--|--|
| 優點 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 合成與分散可以同時進行</li> <li>● 省去奈米顆粒的乾燥步驟</li> <li>● 允許不添加分散劑</li> <li>● 穩定性通常較二階法好</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 能夠大規模且具有成本效益的生產</li> </ul>                      |
| 缺點 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 只能以少量或分批的方式製造</li> <li>● 生產成本高</li> <li>● 溶液中未反應的分子有可能造成問題</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 需對奈米顆粒進行乾燥處理</li> <li>● 在製程中可能出現團聚結塊</li> </ul> |



## 2.3 奈米流體的穩定性

奈米流體一般來說雖然在初始的製備後便具有一定程度的懸浮穩定性，但能否維持持續的穩定度依然是奈米流體一項重大的挑戰[18, 19]，因為奈米顆粒之間的凡德瓦力，奈米顆粒在高頻率的相互碰撞下粒子之間團聚的可能性會大幅的增加，為了消除奈米粒子之間容易團聚的趨勢必須對奈米流體進行額外的處理，因奈米流體本身的不穩定而造成的可能性有許多，團聚後的奈米顆粒因為顆粒過大導致本身的布朗運動無法克服地心引力最終沉降在容器的底部，抑或因為過大的粒徑造成流體在管道流動後對管壁造成額外的磨損，進而增加維護設備的開銷。諸如此類的原因皆可能造成奈米流體能夠帶來的正面效益逐漸消失。雖然完全消除奈米流體中的團聚現象是否為最佳解還尚未有定論，少數人指出少量的團聚甚至對於奈米流體本身的導熱能力有提升，但可以確定的是團聚現在對於奈米流體本身的懸浮性能會有負面影響，過於快速的沉降對奈米流體的應用是巨大的阻礙。

### 2.3.1 影響穩定性的因素

奈米流體的穩定性主要取決於奈米顆粒的團聚程度，在製備奈米流體的過程中避免粒子團的形成是重要的目標，因此通常在製作的過程中就會進行適當的分散，再者便是增長奈米流體在使用過程中維持穩定的時間長度，下述為影響奈米流體的幾項主要因素：

1. 介電係數 (dielectric constant)：基礎流體的介電係數是影響穩定性的常見因素，介電係數與排斥勢成正比，因此越高的介電係數通常代表著越高的穩定性[20]。
2. 界達電位 (Zeta potential)：界達電位指的是膠體粒子上固定層與擴散層之間形成的電位差，因此通常用來評估粒子之間

的排斥力[20]，但界達電位對於奈米流體來說並非非常準確的穩定性評估標準，除非奈米流體本身主要依靠靜電來做為分散性的依據[21]。

3. 形貌大小：奈米顆粒本身的大小亦是影響奈米流體穩定的重要因素之一，顆粒大小會影響顆粒之間的吸引力與排斥力，且一般來說越小的粒徑具有更高的團聚趨勢，從文獻中可以看到的是通常磚形顆粒具有最高的排斥力而葉片狀的顆粒則最低[20]。
4. 流體濃度：流體濃度會對顆粒之間相互碰撞的頻率有直接的影響，碰撞的頻率越高將會增加團聚的機率[20]。

### 2.3.2 增進穩定性的機制

有許多方法可以用以評估奈米流體的穩定性，常見的評估法有靜態靜置法（natural sedimentation）、界達電位測量法（Zeta potential measurement）、UV-VIS 分光光度法（UV-VIS spectrophotometry）、光學光譜分析（optical spectrum analysis）、離心法（centrifugation）與動態光散射（dynamic light scattering）等等，上述方法都可以從文獻中看到詳細的描述[11, 14]，而為了增進奈米流體的穩定性進而提高研究成果的應用性，有許多提高奈米流體穩定性的手段被廣泛使用在奈米流體的製程上，其中分散劑的添加與酸鹼（pH）值的調整是最常見的方法，下述為常見幾項用來增進奈米流體穩定性的方法：

1. 調整酸鹼（pH）值：流體的酸鹼值可以經過調整後影響奈米顆粒表面的電荷密度進而提高奈米流體的穩定性，一些研究指出在酸鹼值等於 7 的時候奈米流體容易產生團聚的現象，然而在酸鹼值較高與較低的時候則會得到改善[20, 22–25]，但過酸或是過鹼的奈米流體有可能在應用的同時造成管路的腐

蝕進而增加設備維護的費用與成本[26]。

2. 添加分散劑或是介面活性劑：添加分散劑是奈米流體研究中最為常見用來增進穩定性的手段，而分散劑因為其本身帶有的疏水或親水基改變奈米流體的混和均勻度，分散劑可以大致上分為陰離子、陽離子、非離子與兩性型，其中非離子型較為常見的有聚氧化乙烯 (polyethylene oxidized, PEO)、聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG)、聚甲基丙烯酸 (polymethacrylic acid, PMAA)、聚乙烯吡咯烷酮 (polyvinylpyrrolidone, PVP)、油酸 (Oleic acid)、阿拉伯膠 (gum arabic, GA) 等[20, 27]，而常見的離子型分散劑有溴化十六烷基三甲銨 (cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)、溴化十二烷基三甲銨 (dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB)、十二烷基硫酸鈉 (sodium dodecyl sulfate, SDS)、十二烷基苯磺酸鈉 (sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS)、聚苯乙烯磺酸鈉 (polystyrene sulfonate, PSS) 等等[27, 28]。
3. 表面改質：有少數的分散劑具有在高溫時性能下降的特性[26, 29, 30]，因此為了解決高溫時無法使用分散劑的問題，可以藉由物理或是化學方法來進行表面改質，進而克服無法使用分散劑的問題，如 Chakraborty 與 Panigrahi 提出經由酸或鹼在奈米顆粒表面嫁接官能基的方式，進而提升奈米顆粒在基礎流體中的分散性[20]。

## 2.4 奈米流體之熱交換應用

奈米流體能夠應用在許多領域，表 2.2 為近年來奈米流體應用相關的文獻。

表 2.2 奈米流體應用相關文獻

| 使用材料                               | 用途   | 文獻   |
|------------------------------------|--|------|
| GN                                 | 將 GN 添加至含有相變材料的流體中後發現可以提升約 2.9% 的熱交換性能。                | [5]  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 將其使用於熱交換並且研究其基本性質發現在熱傳導係數方面有最大 13.7% 的提升。              | [31] |
| SiO <sub>2</sub>                   | 將其使用於熱交換並且研究其穩定性與耐腐蝕性，研究結果顯示熱傳導係數上升 36.1% 並且具有優秀的抗腐蝕性。 | [32] |
| TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> | 將其用於燃料電池冷卻系統並研究其基本性質，研究結果發現各項性質皆有提升並且電力的損耗降低至僅 10%。    | [33] |
| GN                                 | 將其使用於熱交換系統，研究結果顯示相較於水在紐塞數上有 28~33% 的提升。                | [34] |
| GN                                 | 利用 GNNF 作為太陽能光電系統的散熱流體，實驗結果顯示可以提升約 23% 的系統效率。          | [35] |

## 2.5 奈米流體之基本性質

### 2.5.1 密度與比熱

密度在熱交換的研究中扮演重要的角色，與密度相關的奈米流體研究在許多研究中都有相當詳細且明確的結論，一般來說奈米流體的密度會遵循混合物的原理去進行計算評估[36,37]，也就是混合物的密度是各成分密度的體積分比，計算的方式如式 2.1 所示。

$$\rho_{nf} = \alpha_p \rho_p + \alpha_{bf} \rho_{bf} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

同理在比熱的計算中，也會利用相當的原理去進行數據處理，奈米流體的比熱值[38]，一般來說也會等同於基礎流體與奈米顆粒的比熱值乘上各自的質量分比，常用的計算公式如式 2.2 所示。

$$c_{nf} = \Phi_p c_p + \Phi_{bf} c_{bf} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

其中  $\Phi$  代表質量分比，實際上在計算中會運用更複雜的運算方式去進行計算，因此 Sharifpur 等人[39]在其研究中提到根據式建立的密度計算模型實際上有忽略奈米顆粒與基礎流體間隙影響的問題，藉由考量這層間隙後建立一項新的運算模型如式 2.3 所示。

$$\rho_{nf,new} = \frac{\rho_{nf}}{\alpha_{bf} + \alpha_p (1 + d_{nl}/r_p)^3} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

其中  $r_p$  代表平均的顆粒粒徑， $d_{nl}$  代表奈米層厚度，從文獻中可以看到他們表示此運算模型在計算密度時與實際的實驗結果有更好的 consistency，然而儘管較小的顆粒粒徑對於比熱的影響是已知的[40-42]，實際對於奈米流體比熱影響的明確因素，仍然具有爭議的空間，像是 Hentschke[43]則認為奈米層不應是比熱增強的主要原因。

## 2.5.2 黏度

一般來說在流體中添加奈米顆粒會影響奈米流體的黏度，在低濃度的情況下，對黏度的影響也相對的低，但隨著濃度的增加奈米顆粒對奈米流體的影響是可能大幅增加的，黏度因其會影響流體摩擦、泵送功率與雷諾數的情況下，始終是一項許多研究者的研究重點。

在 Okonkwo 等人[44]的研究中指出，流體的流變行為與濃度之間並沒有明確的直接關係，但是卻會因材料的不同而有所差異。奈米流體的黏度已經成為許多奈米流體研究的主題，如 Sundar 等人[45]則在研究中針對黏度對奈米流體的影響做了詳細的研究，並且推導出黏度的經驗模型。Qiu 等人[36]也於研究中提出了許多奈米流體的黏度模型，因此可以由上述的研究中發現，黏度在奈米流體的研究中具有重要的研究地位。

## 2.5.3 熱傳導係數

奈米流體相對於基礎流體的熱傳導係數提升是有所被公認的，在許多研究中熱傳導係數都是非常重要的研究主題[36, 46–48]，其中 Qiu et al. [36]所提出的熱傳導係數示意圖在表現熱傳導係數與濃度之間關係上很重要的意義，然而與傳統的流體相比，熱傳導係數在奈米流體領域中的提升原因是依然還在被討論中的問題，有些人認為奈米流體的布朗運動在微觀上對其有重要的影響，但在其他研究中布朗運動被證實與熱傳導係數沒有直接的關係，目前普遍的認知是奈米顆粒的團塊產生是主要的原因之一，另外也有許多研究者提出可能影響熱傳導係數的原因，Fabrizio Iacobazzi 和 de Risi 提出三氧化二鋁奈米流體中團聚的現象對熱傳導係數的影響分析[49]，又奈米流體的分層現象也在其他文獻中被指出可能與熱傳導係數的變動有關[50]。Qiu et al. [36]

則在研究中彙整七項可能影響熱傳導係數的因素，分別為奈米顆粒的濃度溫度、溫度、奈米顆粒的大小、奈米顆粒的形貌、奈米顆粒的團聚情形、酸鹼值與超音波處理的時長。

儘管經過許多的研究，建立能夠預測奈米流體熱傳導係數的運算模型始終是一門受歡迎的研究課題，然而目前並沒有一項單一的模型能夠考慮到所有影響熱傳導係數的因素，或是能夠適應所有運算的情形，可以從 Sobti 與 Wanchoo[46]或是 Qiu et al. [36]的研究中找到看見近年研究者試圖改進的運算模型。

## 2.6 中央處理器之熱設計功耗

熱設計功耗 (Thermal Design Power, TDP) 為電腦中央處理器 (CPU) 重要的散熱參數之一，TDP 的定義一般來說為 CPU 在核心全速運行時晶片的理論發熱瓦數，因此意味著散熱機制必須在單位時間內達到 TDP 的數值才能夠避免 CPU 過熱進而損壞，本研究的加熱瓦數即是參照市面上主流兩大品牌(intel, AMD)之 CPU 所制定之 TDP 來設計，表 2.3 為兩大品牌 CPU 之 TDP 整理[51]。

表 2.3 各品牌 CPU 之 TDP

| 品牌    | 型號        | TDP  |
|-------|-----------|------|
| intel | i9-11950H | 45W  |
| intel | i9-11900  | 65W  |
| intel | i9-11900K | 125W |
| AMD   | R9 5900X  | 105W |
| AMD   | R7 5800X  | 105W |
| AMD   | R5 5600X  | 65W  |



### 第三章 實驗設計

本研究主要探討 GNNF 應用於電子晶片散熱之效益，首先從製備奈米流體開始，利用機械剝離法製成的 GN 粉末進行流體的配置，並且針對 GNNF 的穩定性進行判定與提升，本研究採用添加分散劑的方式來提升流體的懸浮性能，並且使用持續的物理分散手段維持並且增加穩定性。完成實驗流體的配置後針對流體的各项基本性質進行詳細的量測實驗，並且利用這些基本性質對 GNNF 的散熱能力與實用性進行後續進一步的評估。最後將 GNNF 應用於先前架設完成的水冷系統進行熱交換實驗，本研究使用市售的水冷元件進行水冷系統的組裝與設計，降低自行設計水冷系統與真實市售水冷系統的差異，完成量測後再將熱交換實驗的相關數據進行進一步的分析與討論。本研究之實驗流程架構如圖 3.1 所示。

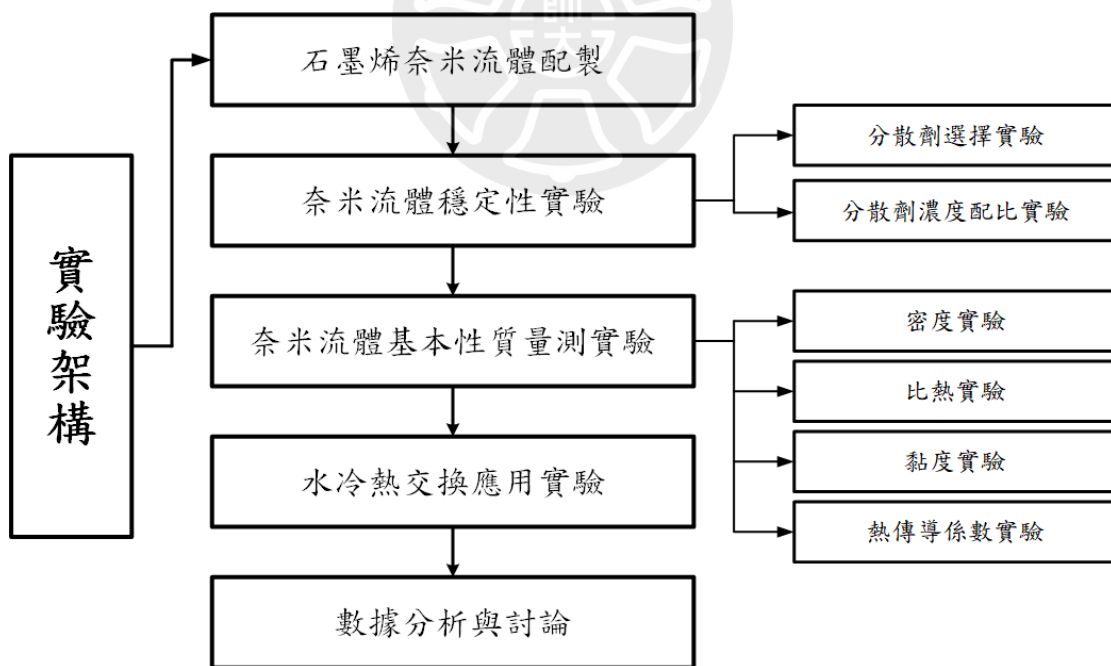


圖 3.1 實驗架構圖

### 3.1 實驗系統

本實驗系統分為三個部分，包含環境控制系統、實驗設備與相關實驗量測裝置，環境控制系統主要控制實驗環境的溫度，降低實驗過程的環境誤差使實驗數據更加準確；實驗設備為水冷散熱系統，與一般市售電腦處理器水冷散熱系統有相同的結構；相關實驗量測裝置包含 GNNF 之基本性質量測儀器與負責記錄實驗數據之儀器兩部分，通過量測儀器得到的數據可以進行進一步的分析討論。

#### 3.1.1 環境控制系統

本研究考量一般電腦 CPU 使用環境多數為公司行號與住家，因此水冷熱交換實驗皆透過環境控制系統保持在一般住家室內溫度，使用一系列的環境控制元件將環境溫度控制在攝氏 25 與 32 度，其中環境溫度採用比例-積分-微分控制器（proportional-integral and derivative controller, PID controller）對石英管加熱器進行控制如圖 3.2，如圖 3.3 所示為實驗之環境控制室俯視圖，使環境溫度能夠維持在實驗所需來降低環境溫度變化對熱交換實驗帶來的不確定性。



圖 3.2 PID 控制器

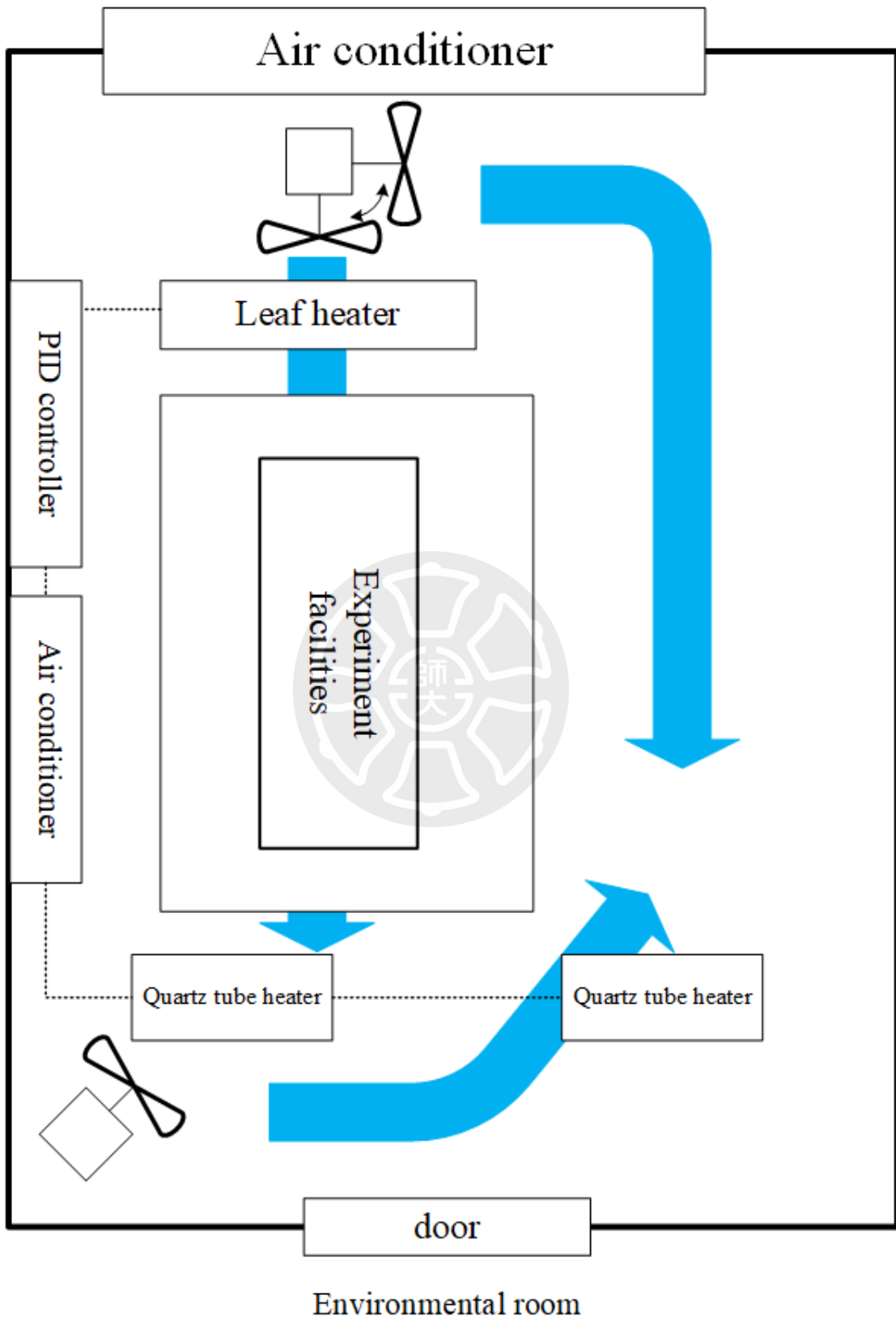


圖 3.3 環境控制室平面圖

### 3.1.2 實驗設備

本研究使用市售之開放式水冷元件 (Bitspower, Taiwan) 自行組裝熱交換實驗設備，降低自行製作設備與市售設備的差異，其中開放式水冷元件的各部件如圖 3.4 所示，分別為水冷元件中的 (a) 水泵、(b) 水冷式熱交換器、(c) 儲水槽與 (d) 氣冷式熱交換器，元件的規格如表 3.1 所示。

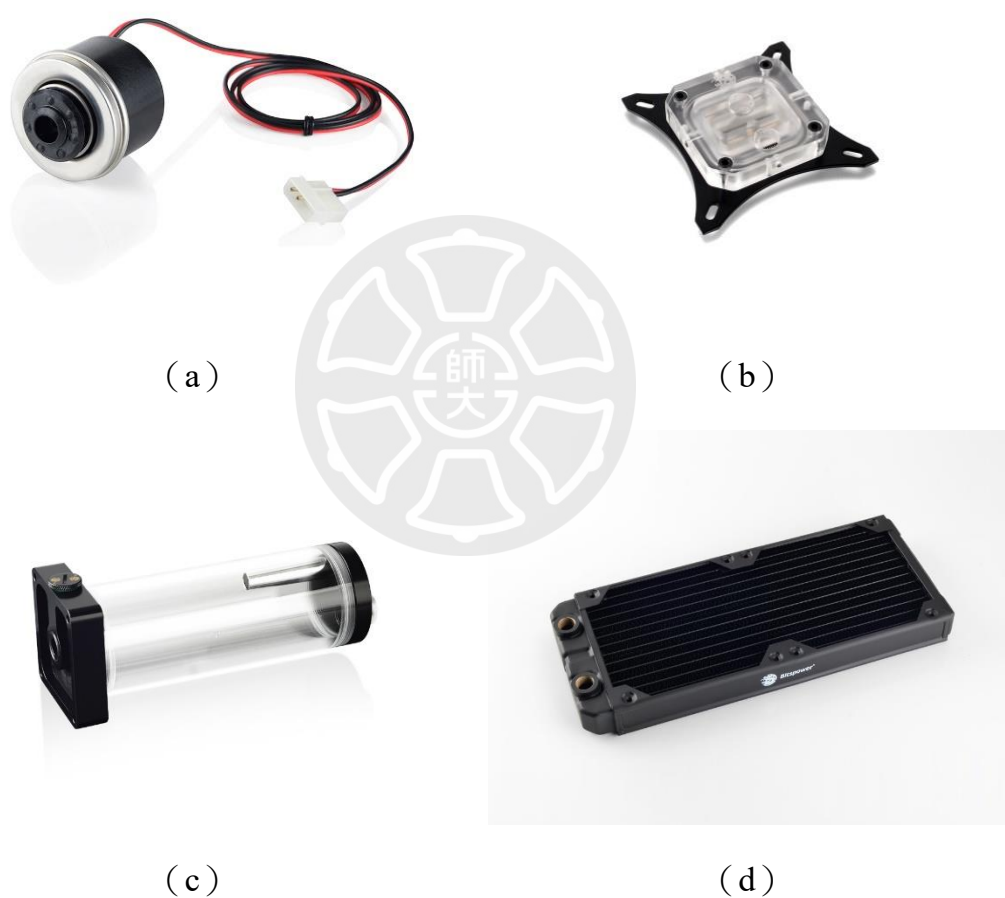


圖 3.4 水冷散熱系統元件圖

表 3.1 各元件規格表

| 元件      | 規格  |
|---------|---|
| 水泵      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 使用電壓：8~24V</li> <li>2. 使用環境溫度：10~50°C</li> <li>3. 使用線路接頭：Molex 4 Pin</li> </ol> |
| 水冷式熱交換器 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 面積：95*95*18 mm</li> <li>2. 水冷頭面板為高純度銅</li> </ol>                                |
| 儲水槽     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 容積 ( <math>\Phi</math>*H )：60*178 mm</li> </ol>                                 |
| 氣冷式熱交換器 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 面積：278*120*29.6 mm</li> <li>2. 16 FPI 25Micron 銅鰭片</li> </ol>                   |



### 3.1.3 相關實驗量測裝置

實驗量測裝置以一臺觸控式無紙式記錄儀對各個管路的出入口水溫、電壓以及流量進行監控與數據記錄。管路水溫皆以 T-type 熱電偶進行溫度量測，為降低溫度量測的誤差，所有熱電偶皆銲接至短銅管內部對流體的溫度進行直接量測，相較管壁外部的間接量測可以得到更準確的溫度數據。為了後續數據的分析在水冷系統其中六處安裝了熱電偶，位置如圖 3.5 所示。另外使用電力分析儀對系統的耗電量進行監控與計算，表 3.2 則呈現各量測元件的編號與代表的數值。

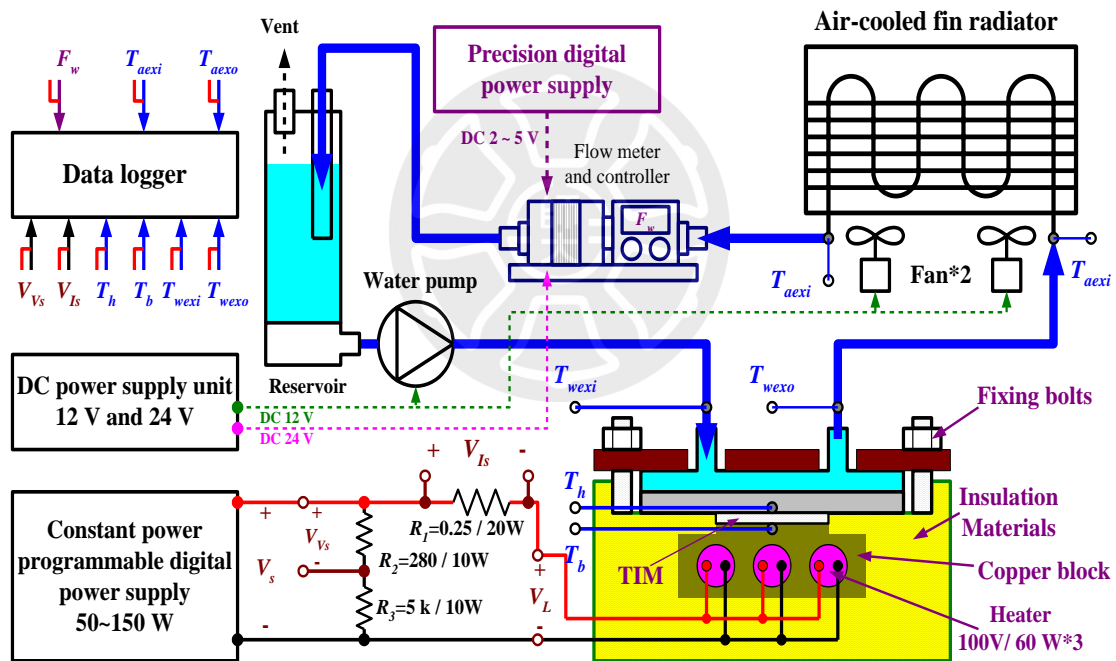


圖 3.5 水冷系統圖

表 3.2 各量測點代號表

| 量測點 | 氣冷式熱交換器   |           | 加熱器      |          |
|-----|-----------|-----------|----------|----------|
|     | 入口溫度      | 出口溫度      | 加熱板      | 水冷頭金屬板   |
| 編號  | $T_{axi}$ | $T_{axo}$ | $T_b$    | $T_h$    |
| 量測點 | 水冷式熱交換器   |           | 加熱負載電壓   |          |
|     | 入口溫度      | 出口溫度      | 負載電流     | 負載電壓     |
| 編號  | $T_{wxi}$ | $T_{wxo}$ | $V_{Is}$ | $V_{Vs}$ |
| 量測點 | 流量計       |           |          |          |
|     | 體積流率      |           |          |          |
| 編號  | $F_w$     |           |          |          |



### 3.2 實驗方法與步驟

本研究的實驗主要分為三大部分，分別為 GNNF 的配製、奈米流體的基本性質量測和奈米流體應用水冷熱交換實驗，實驗步驟的整體架構如圖 3.6 所示。

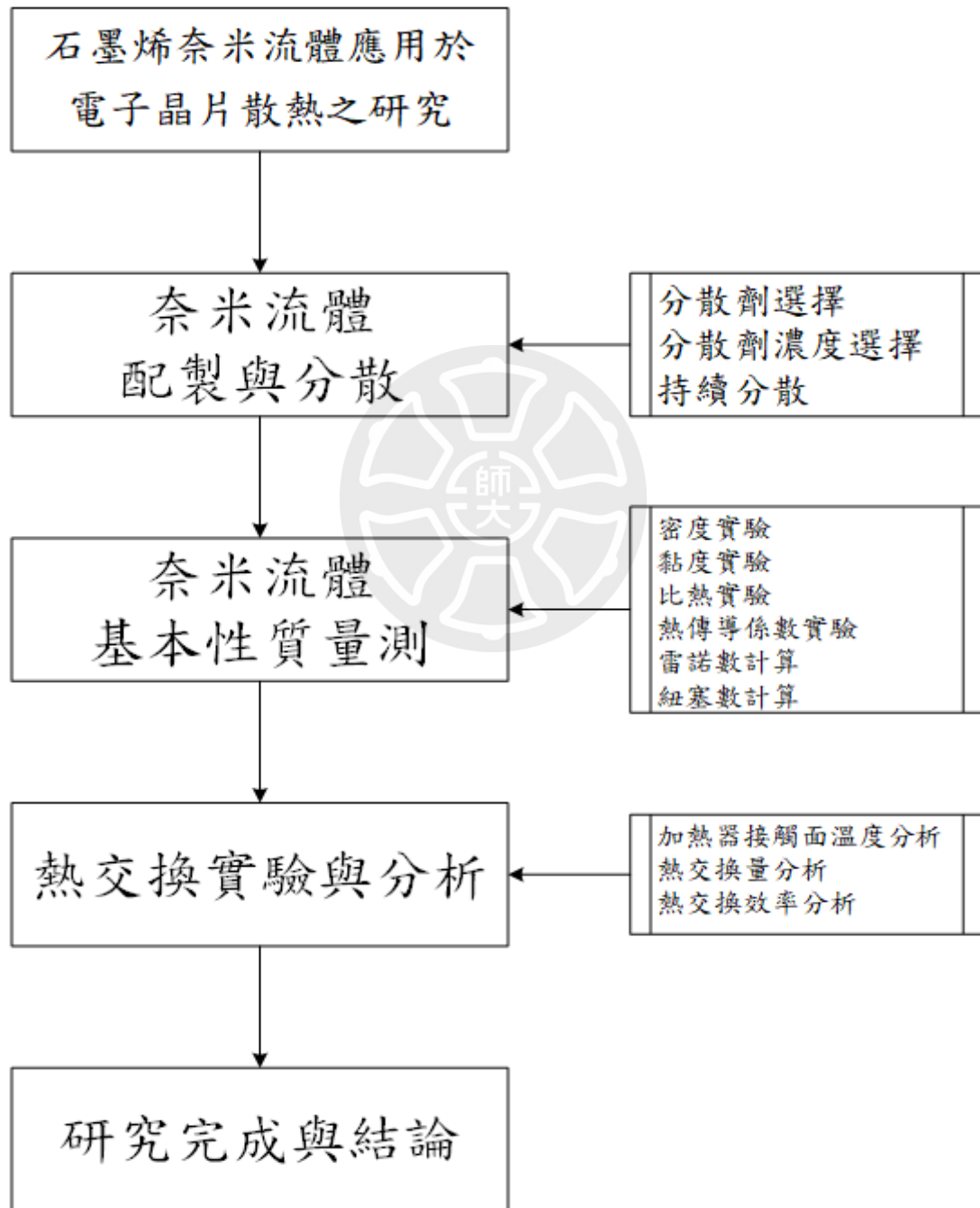


圖 3.6 實驗步驟架構圖

### 3.3 實驗流體配製

本研究使用的流體為石墨烯奈米流體 (GNNF)，製備奈米流體的過程分為四個部分，分別為初步奈米流體配製、分散劑選擇、決定分散劑添加濃度與配製完成後的持續分散，詳細的實驗流程如下述。

#### 3.3.1 奈米流體配製

本研究使用機械剝離法製成的石墨烯粉末 (FNG-320-MF-UHI310)，如圖 3.7 與過濾水進行混合製成初始的 GNNF，為了使 GN 奈米粉末在水中有更好的穩定性，首先使用球磨法對石墨烯粉末進行濕磨後加水製作 0.5 wt% 的初始石墨烯奈米水溶液，接著稀釋成 0.2、0.1、0.05 wt% 三個濃度的實驗流體，為了維持樣本的穩定懸浮，所有樣本皆使用電磁攪拌器與超音波震盪水槽進行持續且長期的分散，圖 3.8 為本實驗使用的石墨烯顆粒於 SEM 下的影像，表 3.3 為本研究使用之石墨烯材料規格。



圖 3.7 石墨烯粉末

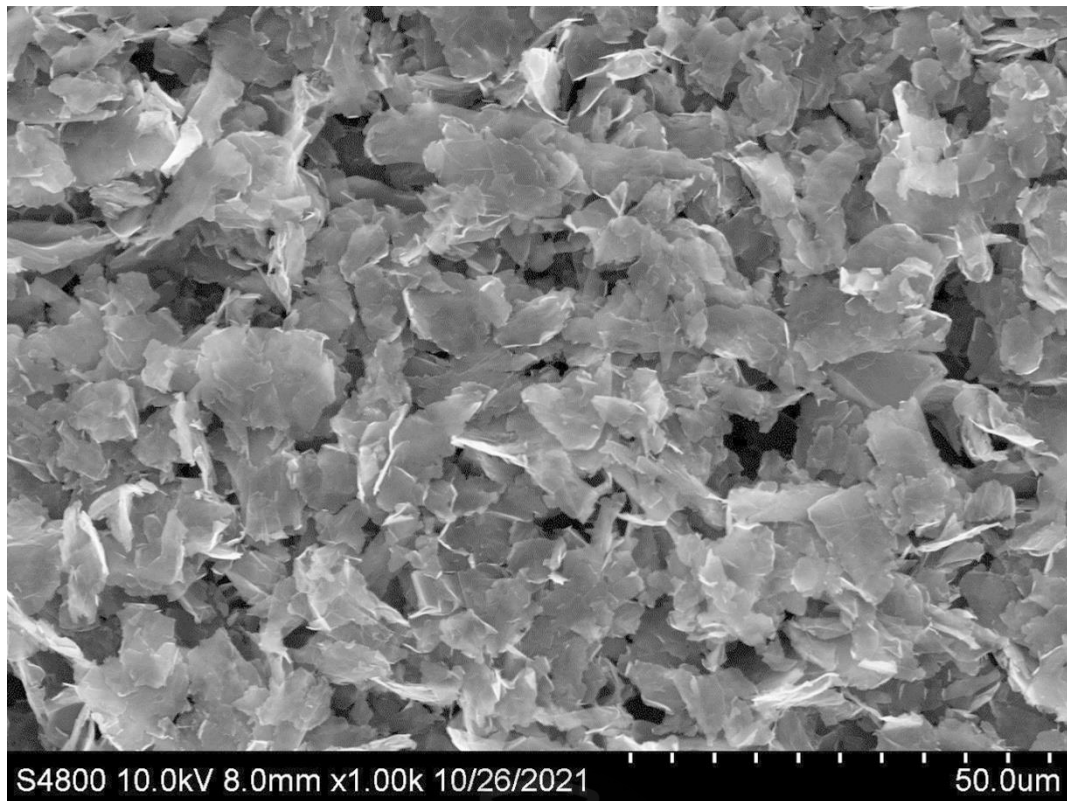


圖 3.8 石墨烯顆粒於 SEM 下之影像

表 3.3 各量測點代號表

| 性質     | 數據       | 單位                     |
|--------|----------|------------------------|
| 廠牌     | 高達光      |                        |
| 產地     | 臺灣       |                        |
| 製作方式   | 複合型機械剝離法 |                        |
| 純度     | >99      | wt%                    |
| 其他碳黑雜質 | <1       | wt%                    |
| 片徑分布範圍 | 0.1~20   | $\mu\text{m}$          |
| 厚度     | <3       | nm                     |
| 比表面積   | >400     | $\text{m}^2/\text{g}$  |
| 鬆密度    | ~0.1     | $\text{g}/\text{cm}^3$ |



### 3.3.2 分散劑決定

奈米流體的穩定性是奈米流體是否能夠應用於實務的重要指標之一，因此為了提升奈米流體的分散性，添加分散劑是最為廣泛使用的手段之一，考慮到現今科技對於環境保護的需求，優先選擇毒性較低對環境或人體較無傷害的分散劑作為候選是本研究重要的考量指標，最後選擇十二烷基硫酸鈉 (sodium dodecyl sulfate, SDS)、十二烷基苯磺酸鈉 (sodium dodecyl benzene sulfonate, SDBS)、聚苯乙烯磺酸鈉 (polystyrene sulfonate, PSS)、溴化十六烷基三甲銨 (cetyltrimethylammonium bromide, CTAB) 與甲聚醣 (chitosan) 等五種常見的分散劑作為本研究的選項，並且利用靜態靜置法針對各分散劑添加至 GNNF 後的提升程度進行判別，最後綜合各分散劑對奈米流體的基本性質影響，決定出本研究使用的分散劑。

### 3.3.3 分散劑添加濃度實驗

為了確認分散劑於實驗流體中最佳的添加濃度，本研究設定了六個分散劑添加濃度 (0、0.0625、0.125、0.25、0.5、1 wt%) 與初步製作的奈米流體呈現六種不同的配比，分別為 1:8、1:4、1:2、1:1、2:1 以及無添加，並且使用靜態靜置法作為樣本穩定性的第一判定依據，為了方便觀察樣本的沉降情形，本研究使用 50 mL 的透明樣本瓶分裝並且依據設定好的濃度比例，配置分散劑添加濃度實驗的各比例實驗樣本，並且根據使用的分散劑決定是否使用消泡劑消除樣本起泡的問題，除了使用靜態靜置法之外，本研究同樣使用其他常見的穩定性判定機制作為輔助，諸如吸收光譜實驗與 Zeta potential 量測，利用奈米顆粒在樣本瓶中沉降後使光更容易穿透造成對光的吸收值下降的概念，使本實驗更加精確的得知各樣本的沉降情形，進而優選出最

佳的濃度配比以進行後續的熱交換樣本配製與熱交換水冷實驗，如圖 3.9- (a) 所示為本實驗使用的可見光光譜儀。

### 3.3.4 奈米流體分散處理

完成配製後的 GNNF 為了保持穩定懸浮性，本研究除了使用電磁攪拌器與超音波震盪水槽進行持續的分散外，為了增進分散劑與消泡劑及流體的混合程度，使用超音波破碎機 (Q700, Qsonica, USA) 與高速均質機進行長時間的震盪與攪拌，破碎機從內部震盪能夠讓 GN 片狀的結構更加的分散，並且均質機的攪拌刀頭也可以利用軸心與刀頭管壁之間縫隙形成的剪切力對奈米流體中的奈米顆粒進行更深一步的破碎分散，使 GN 易團聚堆疊的情形得到進一步的緩解。如圖 3.9- (b) 所示為樣本分散時使用的超音波破碎機。

## 3.4 基本性質量測實驗

為了後續的實驗數據分析，針對 GNNF 的各項基本性質進行一系列的量測記錄，基本性質量測實驗分為四個部分，分別為密度實驗、黏度實驗、比熱實驗以及熱傳導係數實驗，詳細的實驗流程細節如下所述。

### 3.4.1 密度實驗

計算熱交換量是在熱交換實驗中十分重要且常見的分析過程，從式 3.6 可以看出通過密度的量測，可以將水冷系統中的體積流率轉換為質量流率，進而計算熱交換實驗的熱交換量以便評估各流體在同樣實驗參數下的熱交換性能，本研究使用密度分析儀 (DA-645, KEM, Japan)，將密度量測溫度範圍設定在攝氏 20 度到 60 度，盡可能的包含熱交換實驗可能的工作溫度範圍下進行密度量測，為了防止流體在量測管路內因升溫形成微小的氣泡對密度的數值造成巨大的誤差，本實驗選擇從高溫量測至低溫並且每隔 10 度取一筆數據的流程來進行，

因此所有樣本皆在量測前使用帶有溫度回授棒的電磁攪拌器進行預熱後再注入儀器中進行實驗，盡可能地降低且省去樣本在注入儀器中後可能的產生加熱時長，如圖 3.9- (c) 所示為本實驗使用的密度分析儀。



### 3.4.2 黏度實驗

奈米流體的黏度一般會隨著奈米顆粒的濃度與分散劑的濃度增加而隨之上升，因此眾多因素對於奈米流體的黏度影響使其變成為奈米流體應被探討的基本性質之一，黏度的高低將會影響奈米流體在應用時的流體工作性質，通過共振式黏度計（VL700-T15, Hydramotion, UK; accuracy:  $\pm 1.0\%$ ）算後得到的常見流體性質雷諾數（Re）是判別奈米流體流動狀態的重要指標，透過雷諾數的高低可以將流動狀態分為層流、過渡流、紊流與完全亂流，進而判定奈米流體在熱交換上的工作性能，同時黏度高的流體也具有較不易透過微小縫隙滲透造成滴漏的問題。本實驗用來量測樣本黏度的儀器如圖 3.9-（d）所示。

### 3.4.3 比熱實驗

在熱交換實驗中比熱為計算熱交換量最為重要的參數，比熱的高低影響流體在熱交換實驗中的散熱能力，添加至基礎流體中的奈米顆粒與分散劑皆為影響奈米流體比熱的重要因素，透過分析添加至基礎流體中的成分對比熱造成的影響，可以對未來奈米流體應用提供有利的參考，在本研究中不同添加濃度對於流體比熱的影響結果被充分的探討，透過熱示差分析儀（Q20, TA, USA）量測 GNNF 的熱流值（H, Heat flow），並利用式 3.1 計算樣本的比熱（Cp）再透過二次回歸方程式的建立作為後續計算熱交換量的依據，其中 E 為機器常數可以藉由標準基礎法求得，Hr 為加熱速率，M 則為樣本的重量的重量，本實驗量測使用的熱示差分析儀如圖 3.9-（e）所示。

$$C_p = \frac{E \times H \times 60}{Hr \times M} \dots\dots\dots (3.1)$$

#### 3.4.4 熱傳導係數實驗

熱傳導係數是熱力性質中最為直觀的一個散熱性能指標，在水冷的範疇中熱傳導係數的高低亦會對整體奈米流體的散熱能力有所影響，但在水冷散熱中，有眾多的因素會影響奈米流體的散熱表現，其中包括雷諾數高低造成的層流、紊流之分，抑或是密度、比熱等等流體本身基礎性質帶來的改變，在流動的狀態下熱對流的性能不同也會為熱交換的性能帶來不同的結果，因此熱傳導係數在本研究中主要作為 GNNF 散熱能力的輔助判斷依據，並非決定性的因子，本研究用來量測的熱傳導分析儀（TEMPOS, Meter, USA）如圖 3.9-（f）所示。





圖 3.9 本研究使用之量測儀器；(a)可見光光譜儀，(b)超音波破碎機，(c)密度分析儀，(d)共振式黏度計，(e)熱示差分析儀，(f)熱傳導分析儀

### 3.5 水冷熱交換實驗

本研究選擇電腦水冷系統作為水冷熱交換實驗的模擬系統，詳細的系統配置如圖 3.5 所示，水冷系統主要選擇開放式水冷系統來做使用，水泵與風扇皆為常見市售電腦 12 V 元件，散熱元件包含水冷式熱交換器與氣冷式熱交換器，藉由將不同的流體注入至系統中進行散熱實驗，水冷式熱交換器緊貼於自行設計的模擬 CPU 加熱負載器並藉由一般市售散熱膏消弭接觸面的微小空隙，加熱負載則藉由可程式電源供應器來模擬三種不同瓦數的穩態與暫態情形，分別是 50 W、100 W、150 W，另外則是利用流量計控制系統的流量來觀察在不同流量下各流體在散熱方面的表現差異，實驗全程皆使用無紙式記錄器與電力分析儀進行數據的紀錄以利後續實驗數據的分析與研究。

### 3.6 數據分析

本研究的數據分析利用基本性質實驗獲得的 GNNF 性質來計算常見的熱流性質，主要分為雷諾數、紐塞數以及熱交換量，藉由分析上述的熱流性質來評估不同濃度的 GNNF 在不同的工作流量與加熱瓦數下的性能，同時在分析數據的過程會將數據轉換為差異百分比(R)，計算方式如式 3.2 所示。

$$R = [(D_{GNNF} - D_{Base})/D_{Base}] \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

### 3.6.1 雷諾數計算

雷諾數作為流體的重要性質是本研究的分析目標，雷諾數的高低可以用以判別流體的工作狀態，由低到高可以分為層流、紊流或是完全亂流，因此可以用來輔助評估奈米流體在不同實驗參數下可能的熱交換性能，一般來說雷諾數越高的奈米流體越趨近於紊流或是亂流，管路內流體的劇烈擾動被認為可以增進熱交換的效率，用來計算雷諾數的公式如式 3.3 所示，計算過程中使用到的黏度與密度均於先前的基本性質實驗中獲得，為確保數值的正確性將數值進行平均後迴歸再帶入至雷諾數公式中進行計算。

$$Re = \frac{\rho V_m D_h}{\mu} \dots\dots\dots(3.3)$$

### 3.6.2 紐塞數計算

為了進一步評估不同濃度奈米流體的熱交換性能，紐塞數 (Nu) 也是本研究中分析的熱流性質之一，紐塞數的高低在比較熱對流能力上有更為直接的意義，計算過程中會先使用式 3.4 計算出對流係數，再通過式 3.5 得出紐塞數，紐塞數的可以用以表示熱對流強烈程度，因此在主要分析水冷散熱的本研究中有重要的意義，計算過程中使用的熱對流性數與熱傳導係數皆透過本研究的實驗中獲得，使用透過熱交換實驗獲得的熱交換量與基本性質實驗中獲得的熱傳導係數來計算出所需要的數值。

$$h = Q_{ex} / \left\{ A_s \times \left[ T_b - \left( \frac{T_o - T_i}{2} \right) \right] \right\} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \dots\dots\dots (3.5)$$

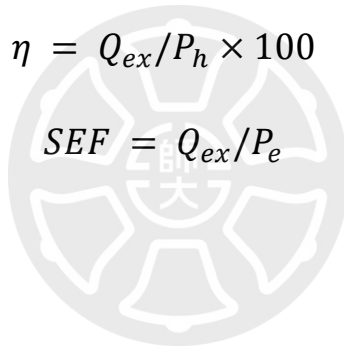
### 3.6.3 熱交換分析

在散熱研究中熱交換量的分析是不可或缺的一部分，本研究將計算每個不同流速與加熱瓦數下的熱交換量(Q)並且分析其性能，詳細的計算方式如式 3.6 所示，除了基本的熱交換量計算之外，本研究亦會分析熱交換量與消耗功率與加熱瓦數的關係，計算出熱交換器效率 ( $\eta$ ) 的提升與 SEF (System Efficiency Factor)，用以評估添加 GN 後的奈米流體是否對熱交換性能有所提升，並且分析濃度是否對於熱交換的性能有所影響，計算方式如式 3.7 與式 3.8 所示。

$$Q_{ex} = F_w \times \rho \times Cp \times (T_o - T_i) \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\eta = Q_{ex}/P_h \times 100 \dots\dots\dots (3.7)$$

$$SEF = Q_{ex}/P_e \dots\dots\dots (3.8)$$



### 3.7 不確定性分析

本研究的不確定性分析通過式 3.9 去計算得出，詳細的不確定性分析如表 3.3 所示。

$$U_e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_{n-1}^2 + e_n^2} \times 100\% \quad \dots (3.9)$$

表 3.4 各項目之不確定性分析

| 項目       | 相對不確定性 | 說明              |
|----------|--------|-----------------|
| 環境控制     | 0.81%  | 熱電偶與 PID 控制器的誤差 |
| 共振式黏度計   | 2.24%  | 黏度計與恆溫水槽的誤差     |
| DSC 比熱   | 1.08%  | 儀器的溫度與熱值誤差      |
| 密度分析儀    | 0.12%  | 密度計的溫度與密度誤差     |
| 流量計      | 3.00%  | 流量計與資料擷取器的誤差    |
| 單點溫度     | 0.76%  | 熱電偶與資料擷取器的誤差    |
| 熱傳導係數    | 5.39%  | Tempos 與恆溫水槽的誤差 |
| 雷諾數      | 3.29%  | 各項計算參數與環境誤差     |
| 熱交換量     | 3.77%  | 各項計算參數與環境誤差     |
| 系統效率 SEF | 3.78%  | 各項計算參數與環境誤差     |
| 對流係數 h   | 3.85%  | 各項計算參數與環境誤差     |
| 紐塞數 Nu   | 6.62%  | 各項計算參數與環境誤差     |

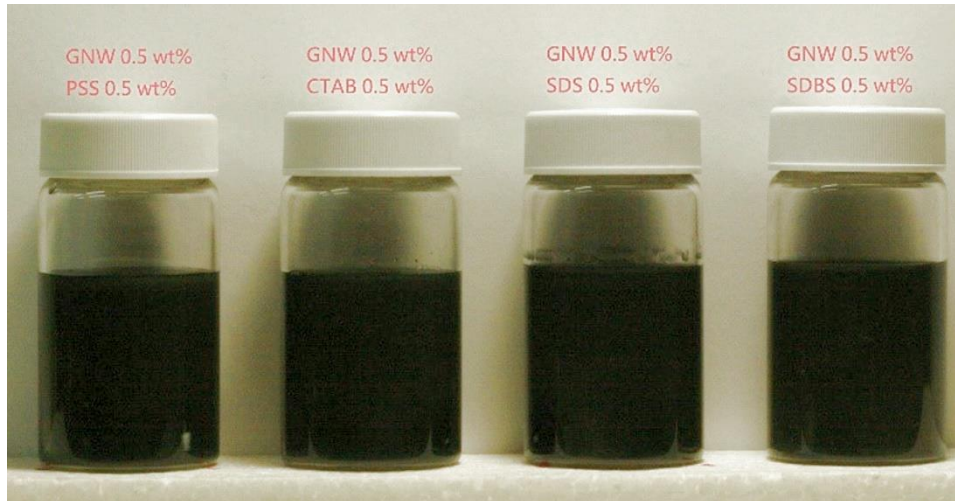
## 第四章 結果與討論

### 4.1 奈米流體配製結果

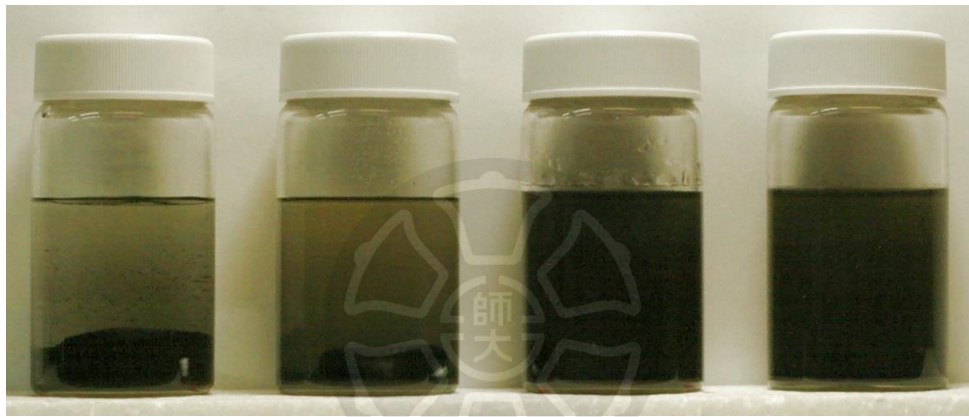
本研究利用機械剝離法製造的 GN 奈米顆粒並且通過二階合成法配製出 GNNF，再完成分散劑添加與分散劑濃度的選擇，最終製備出符合後續熱交換實驗需求的奈米流體樣本，詳細的實驗結果如下所述：

#### 4.1.1 分散劑決定實驗

本實驗選擇五種常見且對環境危害較低的分散劑(Chitosan、SDS、SDBS、CTAB、PSS)作為候選，分別在 GN 濃度 0.5 wt% 的 GNNF 中以 1:1 的比例添加其中，並且透過靜態靜置法進行為期七天的實驗作為穩定性判定依據，其中殼(甲)聚醣(chitosan)因其過高的黏度被判定不適合作為熱交換流體使用，因此在較早的實驗中被淘汰，但其相較其他分散劑對環境有更低的危害所以在未來的研究中依然具有相當不錯的潛力，本研究將透過此項實驗決定往後的實驗中將使用何種分散劑，實驗結果如下數張圖所示。圖 4.1 為各樣本使用靜態靜置法進行穩定性實驗的照片，從照片中可以看出各樣本在初始配置完成時皆沒有沉降的情形，然而在各樣本放置至第七天後可以發現第一個樣本 PSS 與第二個樣本 CTAB 皆發生非常嚴重的沉降情形，由此可以此二種分散劑並不適合用於添加至石墨烯奈米流體中作使用，而第四個樣本 SDBS 同樣出現了少量的沉降情形，相比第三個樣本 SDS 只有些微肉眼觀察下不太清晰的沉降，本研究判斷在 GNNF 的配製中，SDS 是最佳的分散劑選擇。



(a)

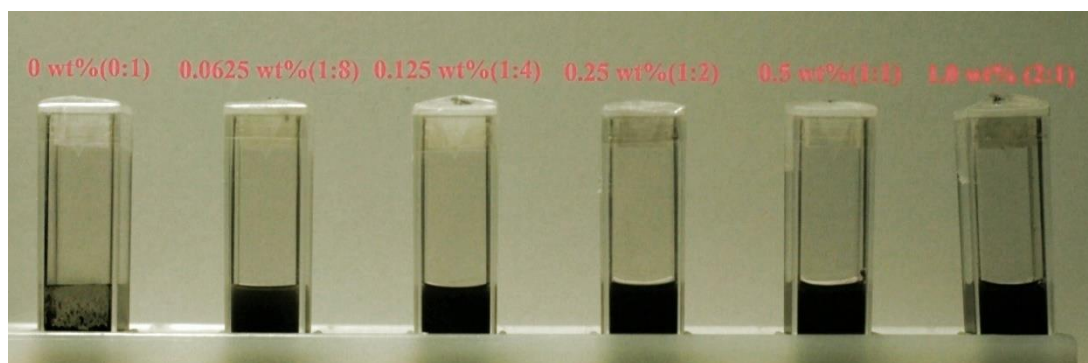


(b)

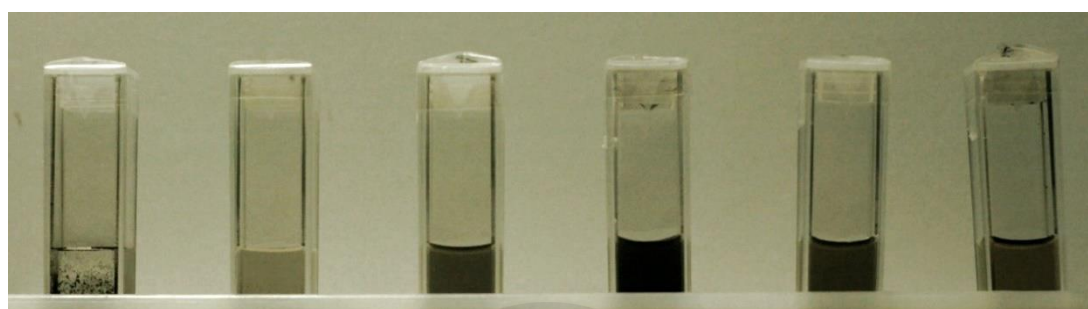
圖 4.1 分散劑決定實驗靜態靜置法；(a) initial, (b) After 7 days

#### 4.1.2 分散劑濃度配比實驗

前一個實驗中從數個分散劑中決定使用 SDS 作為本研究的分散劑，為了確保分散劑在 GNNF 中的最佳添加量，設定了六個不同的添加濃度（0、0.0625、0.125、0.25、0.5、1.0 wt%）來進行後續的分散劑濃度配比實驗，分別與 GN 的添加濃度 0.5 wt% 呈現不同的比例，並透過為期七天的靜態靜置法來確認最佳的配比。圖 4.2 為各樣本在靜態靜置法倒入樣本瓶中後的照片，從圖中看到沒有添加任何分散劑的樣本在初始配製好的同時就已經產生肉眼可見的沉降，並且各樣本在放置一天後可以發現，0.0625 wt% 與 0.125 wt% 添加濃度的樣本已經產生相當明顯的沉降情形，0.5 wt% 與 1.0 wt% 也開始產生初步的沉降，在放置七天後除了 0.25 wt% 以外所有樣本都產生了相當嚴重的沉降，因此從上述的實驗結果可以判斷本研究分散劑與 GN 最佳的添加比例為 1：2，後續實驗都將以這個比例配製不同 GN 濃度的樣本。



(a)



(b)

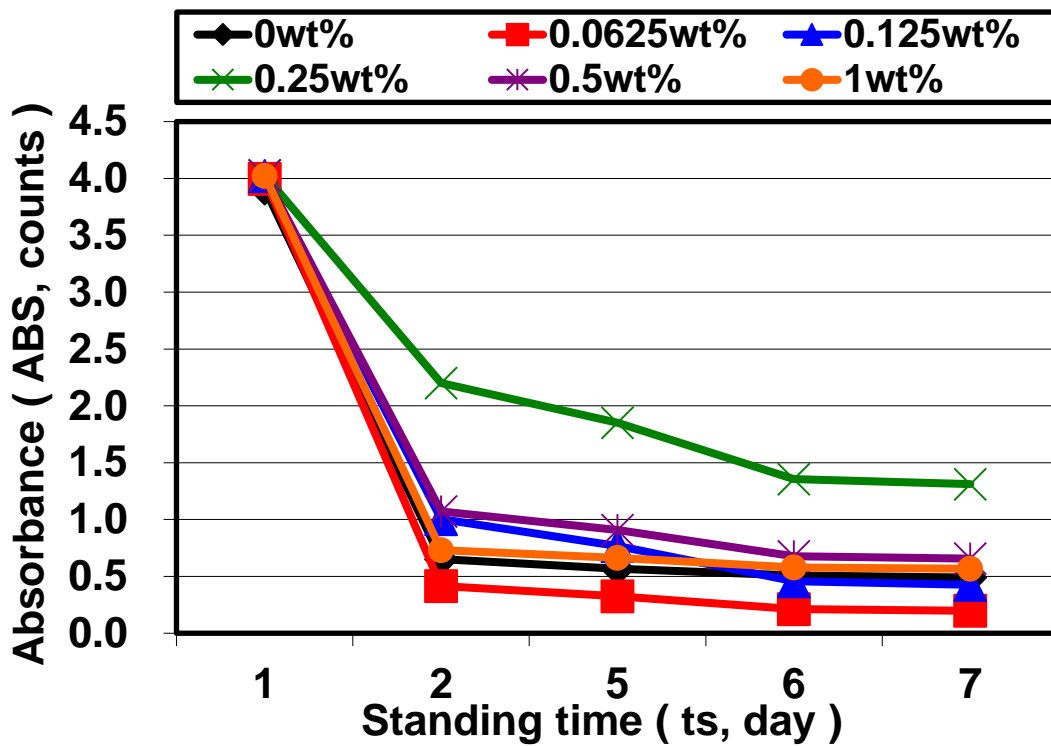


(c)

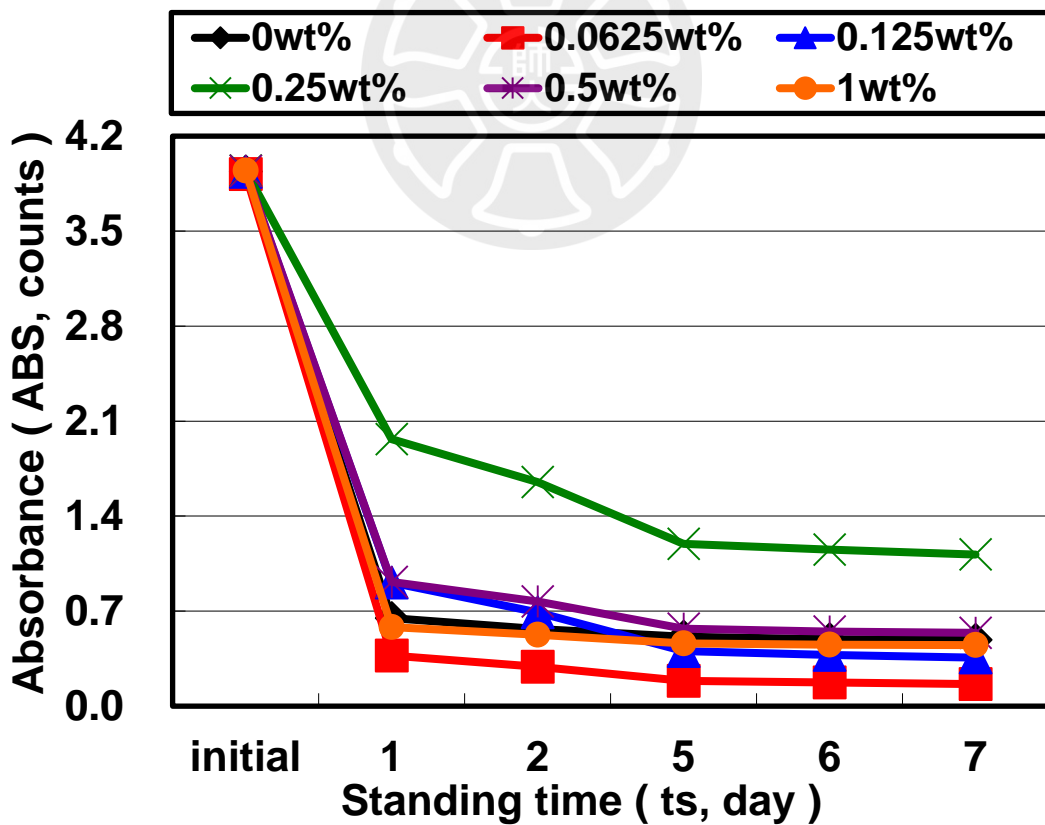
圖 4.2 分散劑濃度配比實驗靜態靜置法；(a) initial, (b) After 1 day, (c) After 7 days

### 4.1.3 吸收光譜之穩定性分析

本研究使用靜態靜置法作為分散劑配比實驗的主要判斷依據，為了確保實驗結果的可靠度，本實驗使用了可見光光譜儀（V670, Jasco, Japan）量測各樣本在放置不同天數後的吸收光譜，從吸收光譜的變化中判斷各樣本的沉降程度，作為分散劑濃度配比實驗的輔助判斷依據，增加靜態靜置法結果的可信度並且讓實驗結果有更加清楚直觀的趨勢表現。圖 4.3 為各濃度樣本的吸收值變化圖，為了避免吸收值的峰值影響吸收值的差異判斷，本實驗選取了兩個光譜中較為平坦的波長區域（550 nm、700 nm）作平均，從圖 4.3 中可以看出，雖然各樣本在靜置的過程中皆產生沉降的情形，但 0.25 wt% 添加濃度的樣本具有最高的平均吸收值，因此可以得知其具有最佳的懸浮穩定性，圖 4.4 則是各樣本在靜置下的差異百分比，從圖中可以發現與上述相同的結論，0.25 wt% 的樣本具有最低的差異百分比。

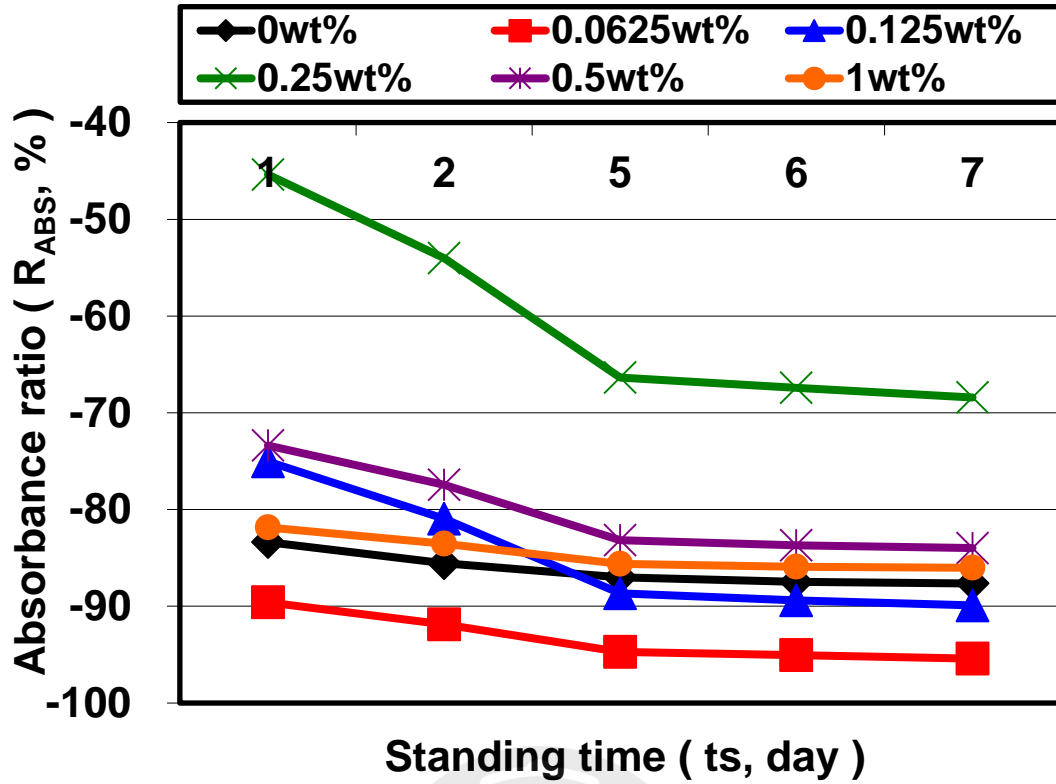


(a)

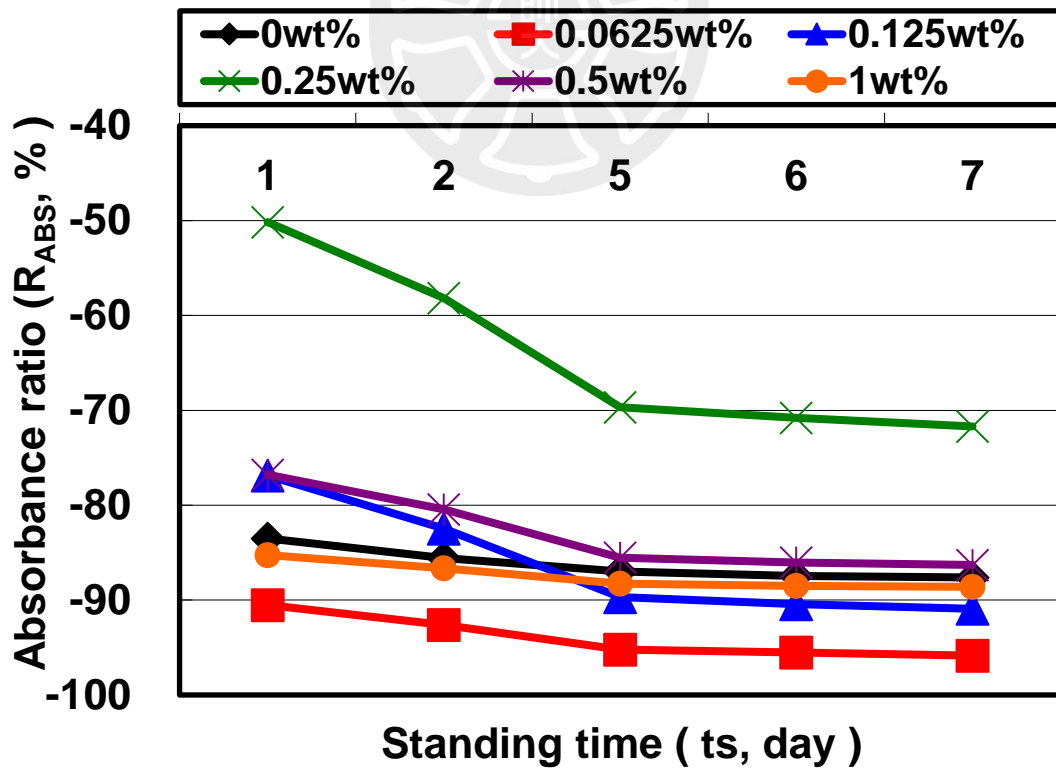


(b)

圖 4.3 各濃度樣本吸收值變化圖；(a) 550 nm, (b) 700 nm



(a)



(b)

圖 4.4 各濃度樣本吸收值差異百分比；(a) 550 nm, (b) 700 nm

#### 4.1.4 Zeta Potential 之穩定性分析

界達電位 (zeta potential) 作為分析奈米流體穩定性常見的參數在本研究中也同樣作為穩定性的輔助判斷依據，本實驗使用雷射粒徑分析儀量測，並且每個樣本均經過三次的量測後平均降低誤差，圖 4.5 為各樣本在 25°C 下的 Zeta potential，可以從圖中 0.0625 wt%、0.125 wt% 與 0.25 wt% 的 Zeta potential 並沒有太大的差距，並且從數值上可以判斷的是這三個樣本都有不錯的穩定性。

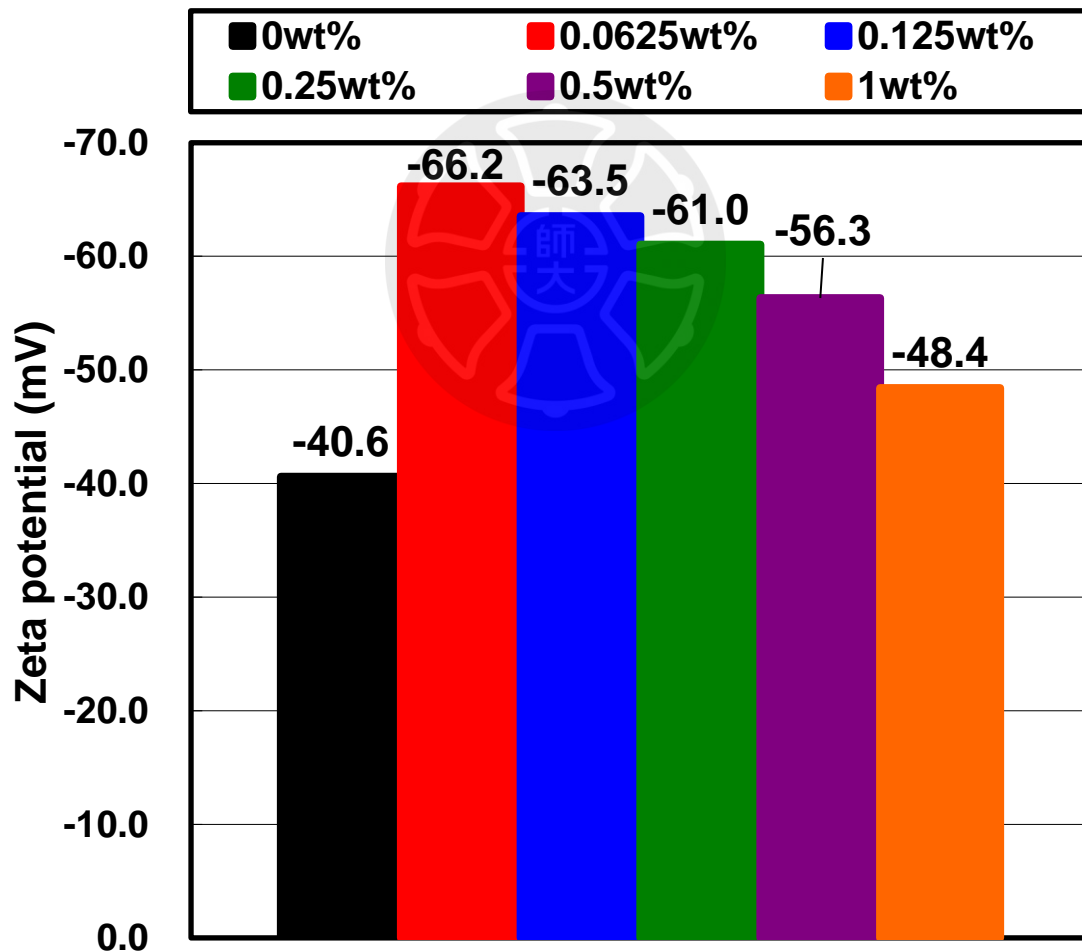


圖 4.5 各濃度 GNNF 之 Zeta potential

## 4.2 基本性質量測結果

本研究的基本性質量測結果分為四個部分，分別為密度分析、黏度分析、比熱分析與熱傳導係數分析，根據量測的結果建立各參數的回歸方程式後，用以後續的熱交換性能分析使用，並且能夠探討各基本性質在溫度與濃度影響下的變化。

### 4.2.1 密度分析

本研究使用密度分析儀量測不同 GN 重量百分濃度的樣本在 20~60°C 之間的密度，圖 4.6 為量測的結果圖，從圖中可以看到不管是何種濃度的 GNNF，都會隨著溫度的上升有密度下降的趨勢，並起隨著 GN 濃度的增加密度也會有較高的趨勢，將量測的數值經過 SPSS 的分析後，得到各濃度 GNNF 在溫度變化下的回歸方程式如表所示，通過回歸方程式的建立可以在後續熱交換數據的分析中扮演重要的角色。

表 4.1 各濃度 GNNF 密度回歸方程式

| 項目               | 回歸方程式   |
|------------------|---|
| Water            | $\rho = 1001 - 0.06 \times T - 0.004 \times T^2$                                |
| GNNF<br>0.05 wt% | $\rho = 1000 + 3.78 \times 10^{-2} \times T - 5.1 \times 10^{-3} \times T^2$    |
| GNNF<br>0.1 wt%  | $\rho = 1000 + 3.337 \times 10^{-2} \times T - 5.057 \times 10^{-3} \times T^2$ |
| GNNF<br>0.2 wt%  | $\rho = 1001 + 3.364 \times 10^{-2} \times T - 5.064 \times 10^{-3} \times T^2$ |

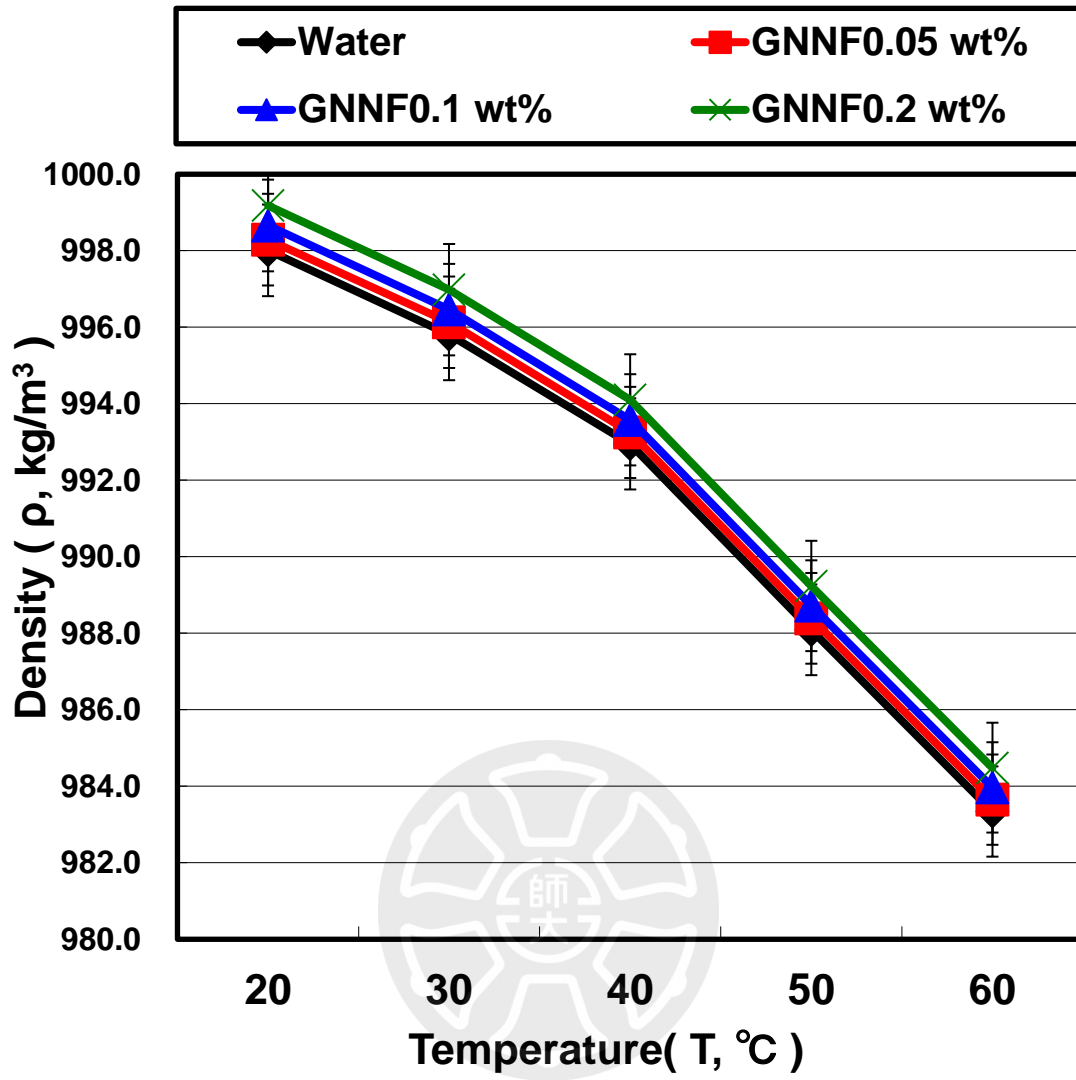


圖 4.6 GNNF 在不同溫度下的密度

## 4.2.2 黏度分析

從式 3.3 中可以看到，為了推導熱流性質中相當重要的雷諾數必須使用到流體的黏度，本研究使用共振式黏度計來對各個濃度的樣本進行量測，且為了降低量測的誤差每個樣本皆經過五次的量測後再平均，圖 4.7 為各濃度 GNNF 在溫度區間 20~50°C 的黏度變化趨勢，可以從圖中看到無論是哪個濃度的樣本在溫度上升的過程下皆有黏度下降的情形，此現象主要由於分子間的距離加大因而內摩擦減弱造成，且黏度同樣都會因 GN 濃度的下降而隨之下降，此現象則是因為 GN 的黏度大於水的黏度，因此 GN 的添加濃度越高將提高 GNNF 的黏度且反之亦然。與密度相同為了方便準確的計算後續的雷諾數等性質，使用了 SPSS 將各溫度下的黏度建立成回歸方程式，詳細各濃度樣本的回歸方程式如下表 4.2 所示。

表 4.2 各濃度 GNNF 黏度回歸方程式

| 項目               | 回歸方程式  |
|------------------|--|
| Water            | $\mu = 0.001 - 1.26 \times 10^{-5} \times T$ |
| GNNF<br>0.05 wt% | $\mu = 0.001 - 1.22 \times 10^{-5} \times T$ |
| GNNF<br>0.1 wt%  | $\mu = 0.001 - 1.12 \times 10^{-5} \times T$ |
| GNNF<br>0.2 wt%  | $\mu = 0.001 - 1.14 \times 10^{-5} \times T$ |

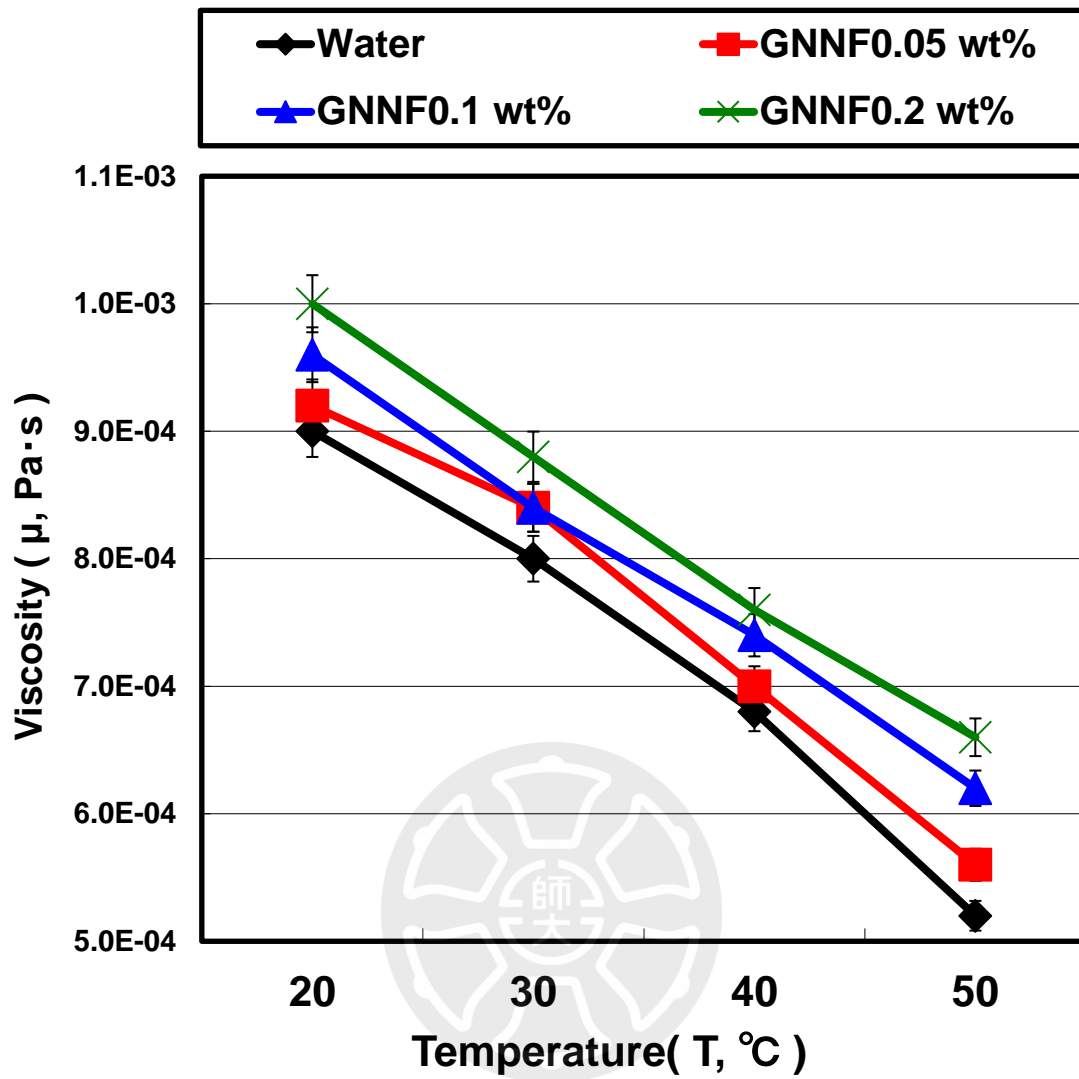


圖 4.7 GNNF 在不同溫度下的黏度

### 4.2.3 比熱分析

本研究同樣針對比熱這項重要的數值進行了量測與計算，本實驗中使用了熱示差分析儀作為實驗的量測用儀器，並將量測的溫度範圍設定在 20~50°C，圖 4.8 為比熱量測結果的數據圖，相較於黏度與密度具有較為固定的趨勢，比熱表現出了較具有特色的情況，首先在溫度的變化下從實驗結果可以發現到的是不管是何種濃度的 GNNF 都沒有太大的變化，因此從這點本研究判斷比熱對於溫度的變化並不顯著，再者 0.05 wt% 的奈米流體展現出了最高的比熱值，理論上因 GN 的比熱遠低於水，越高濃度的 GNNF 應具有越低的比熱，在本實驗的量測中卻發現僅 0.2 wt% 的 GNNF 有比水更低的比熱。承上，分散劑的添加會提升樣本的比熱，故本研究研判這是因為分散劑的添加造成，雖然分散劑與 GN 在各濃度樣本是以等比例的方式添加，但溶解於水中的分散劑對比熱的影響為非線性影響，因此與不溶於水且影響比熱較為線性的 GN 相互拉扯的情況下，造成最後在低濃度(0.05、0.1 wt%) 時有較水更高的比熱，而於 0.2 wt% 則有較水低的比熱。針對各個樣本的比熱值同樣建立了回歸方程式如下表 4.3 所示。

表 4.3 各濃度 GNNF 比熱回歸方程式

| 項目               | 回歸方程式   |
|------------------|---|
| Water            | $C_p = 4.183$   |
| GNNF<br>0.05 wt% | $C_p = 4.347 - 0.002 \times T + 2.724 \times 10^{-5} \times T^2$                |
| GNNF<br>0.1 wt%  | $C_p = 4.312 - 0.004 \times 10^{-5} \times T + 3.938 \times 10^{-5} \times T^2$ |
| GNNF<br>0.2 wt%  | $C_p = 4.117 + 0.001 \times T - 6.143 \times 10^{-6} \times T^2$                |

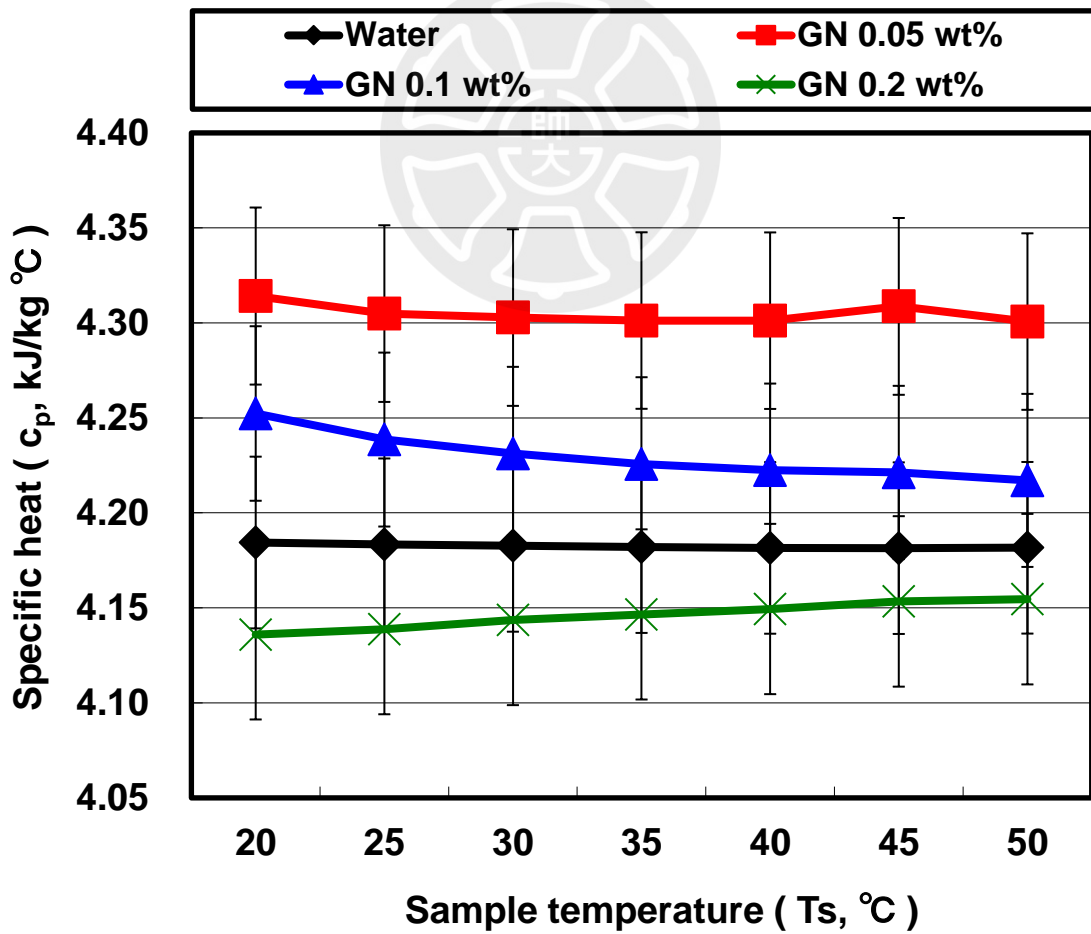


圖 4.8 GNNF 在不同溫度下的比熱

#### 4.2.4 熱傳導係數分析

熱傳導係數是眾多熱流研究中的重點分析目標，在本研究中使用熱傳導分析儀 (TEMPOS, Meter, USA) 在四個不同溫度下 (20、30、40 與 50°C) 量測各樣本的熱傳導係數，希望透過實驗結果能夠分析 GN 與分散劑對於流體的綜合影響，並且將量測的結果利用 SPSS 建立回歸方程式如表 4.4 所示，並且將回歸方程式用於後續計算紐塞數的研究中，熱傳導係數的量測結果如圖 4.9 所示，從圖中可以看出因 GN 的熱傳導係數遠高於水，故熱傳導係數會隨著 GN 的濃度上升而隨之上升又 GNNF 在濃度 0.2 wt% 時有最高的熱傳導係數，並且在溫度上具有相同的趨勢，根據本實驗的結果判斷熱傳導係數的提高除了因為溫度上升外同樣因添加高熱傳導係數的 GN 而影響。

表 4.4 各濃度 GNNF 熱傳導係數回歸方程式

| 項目               | 回歸方程式   |
|------------------|---|
| Water            | $k = -1 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.002 \times T + 0.557$     |
| GNNF<br>0.05 wt% | $k = 5.306 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.002 \times T + 0.619$  |
| GNNF<br>0.1 wt%  | $k = -4.834 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.006 \times T + 0.519$ |
| GNNF<br>0.2 wt%  | $k = -2.272 \times 10^{-5} \times T^2 + 0.004 \times T + 0.553$ |

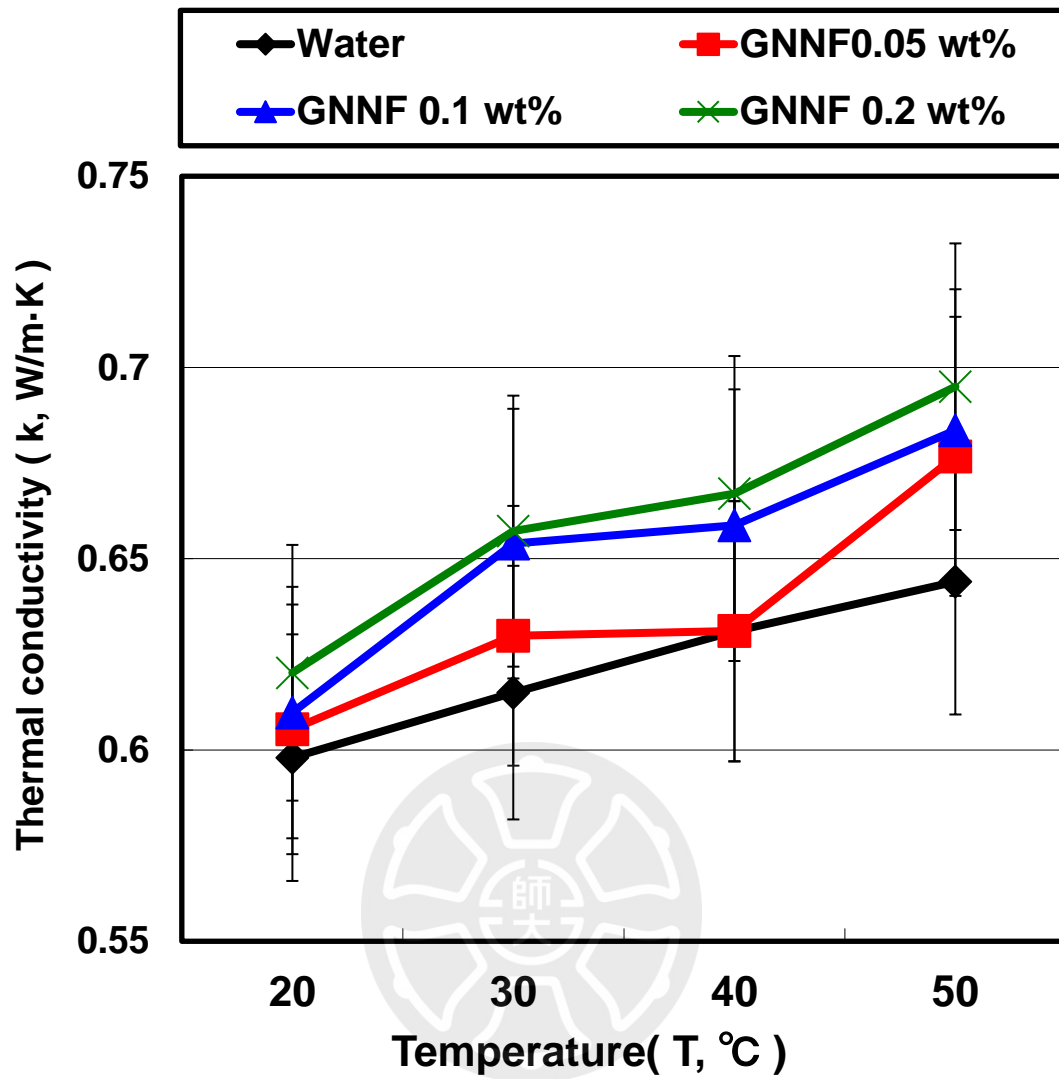


圖 4.9 GNNF 在不同溫度下的熱傳導係數

## 4.3 熱流性質結果分析

### 4.3.1 雷諾數

雷諾數是用來代表流體流動狀態的無因次量，計算的方式如式 3.3 所示，一般來說為了提高奈米流體的熱交換性能，會希望流體的性質在工作狀態下具有較高的雷諾數，雷諾數根據數值的高低可以分為四種流動狀態，分別是低於 2100 的層流、2100~4000 的過渡流、大於 4000 的紊流與大於 10000 的完全亂流，越紊亂的流動狀態因為在管內的劇烈擾動將會增加流體與熱源的接觸頻率，進而使流體具有更佳熱交換性能，圖 4.10、4.11、4.12 為各樣本在不同加熱瓦數下三種實驗流量下的雷諾數，可以發現的是因為水冷系統極為細小的流道幾乎所有的樣本都具有至少紊流至多完全亂流的流動狀態，但依然可以從圖中看到的趨勢是水無論在哪一種實驗參數下都具有最高的雷諾數，GNNF 0.1 wt% 則具有最低的雷諾數。

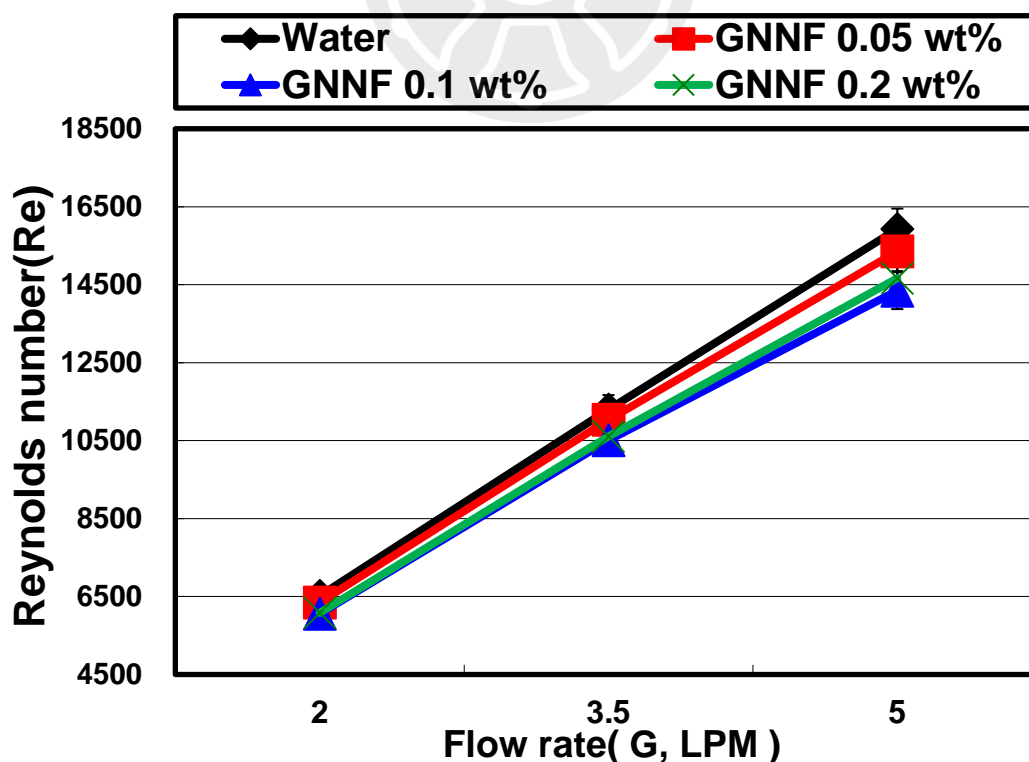


圖 4.10 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (50 W)

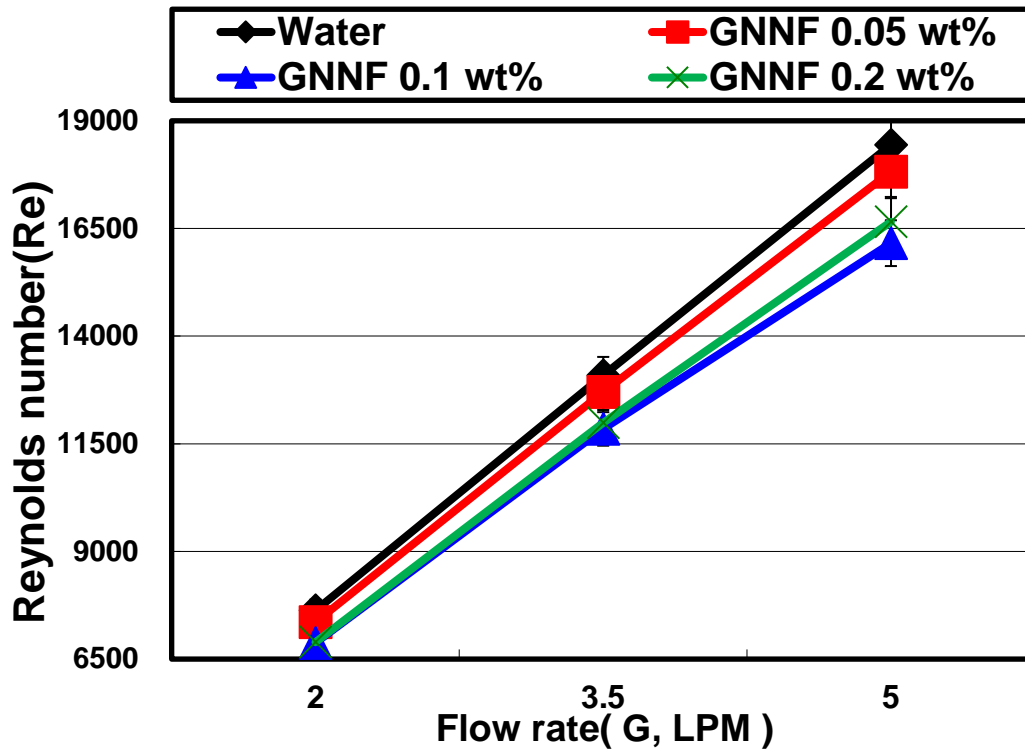


圖 4.11 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (100 W)

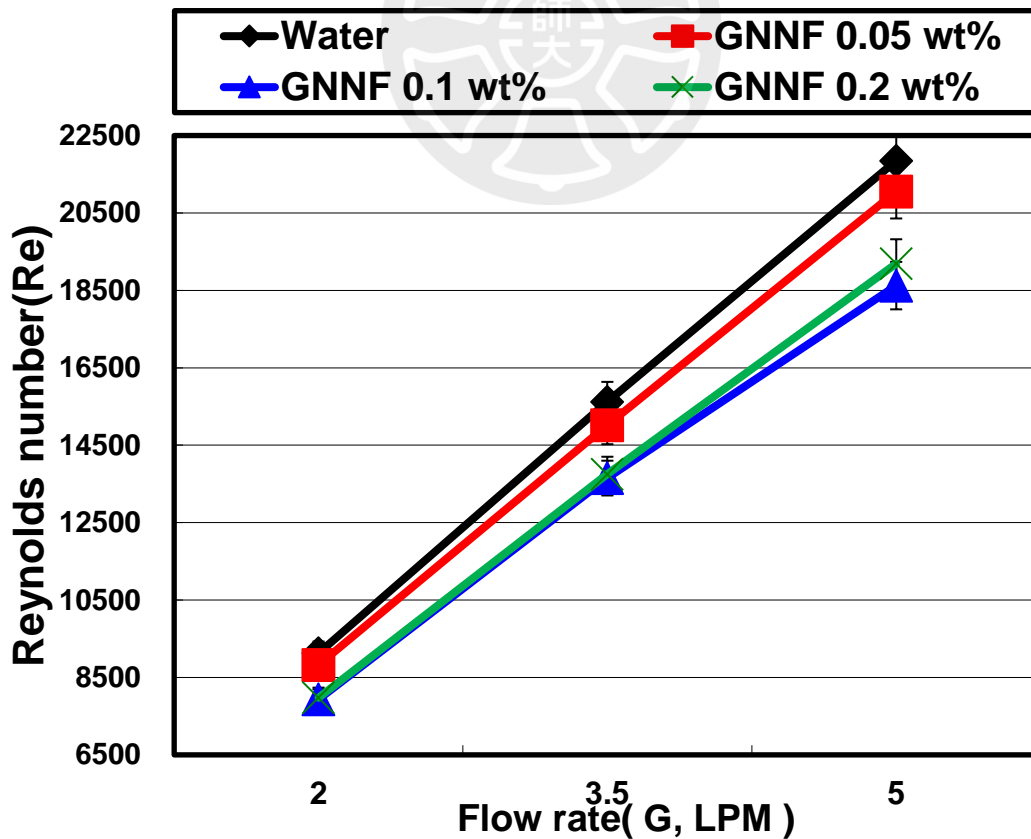


圖 4.12 GNNF 在不同流量下的雷諾數 (150 W)

### 4.3.2 紐塞數

紐塞數 (Nu) 是用來表達對流熱交換強度的無因次量，計算方式如式 3.5 所示，在水冷散熱系統中除了流體本身的熱傳導能力外，流動狀態下的熱對流強度也是影響散熱能力的因素，本研究首先透過式 3.4 計算出各流體的對流係數 (h)，再綜合熱傳導係數 (k) 的量測結果計算出 Nu，詳細的 Nu 分析數據結果如表 4.5 所示，可以從表中看到各濃度 GNNF 皆因流量與加熱瓦數的提升而有較高的 Nu，同時隨著 GN 濃度的提升 Nu 有些微下降的趨勢，本研究判斷這是因為 k 的提高而造成，但在本研究設定的實驗條件下各樣本的 Nu 在濃度的改變下無較明顯的變化量。

表 4.5 各濃度 GNNF 之紐塞數

| 加熱瓦數             | 50 W   |       |       | 100 W |       |       | 150 W |       |       |
|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 流量<br>(LPM)      | 2      | 3.5   | 5     | 2     | 3.5   | 5     | 2     | 3.5   | 5     |
| 樣本               | 紐塞數 Nu |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Water            | 0.267  | 0.278 | 0.287 | 0.277 | 0.292 | 0.300 | 0.279 | 0.294 | 0.303 |
| GNNF<br>0.05 wt% | 0.266  | 0.279 | 0.286 | 0.276 | 0.292 | 0.301 | 0.278 | 0.294 | 0.304 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 0.253  | 0.265 | 0.279 | 0.261 | 0.276 | 0.286 | 0.261 | 0.275 | 0.286 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 0.252  | 0.263 | 0.271 | 0.261 | 0.275 | 0.283 | 0.263 | 0.277 | 0.285 |

## 4.4 水冷熱交換實驗結果

本研究針對水冷熱交換實驗主要有四個分析點，分別為加熱器接觸面溫度 ( $T_b$ )、熱交換量 ( $Q_{ex}$ )、熱交換器效率 ( $\eta$ ) 與系統效率常數 (SEF)，各項的計算方式如式 3.6、式 3.7 與式 3.8 所示，藉由分析數值的高低並且計算差異百分比來評估各濃度流體相對於水的熱交換性能差異，本研究的實驗為了降低誤差對結果的影響皆進行八次並取其中較為集中的五次進行平均與後續的計算，詳細的結果如下所述。

### 4.4.1 加熱器接觸面溫度分析

對於水冷系統來說最直觀的性能評估標準就是加熱器接觸面的溫度 ( $T_b$ )， $T_b$  越低代表使用的工作流體與熱交換器散熱的性能越優異，所以本熱交換實驗的結果將從  $T_b$  討論起，如表 4.6、4.7、4.8 所示，在本實驗設計的三種不同加熱瓦數與兩種不同環境溫度下無論是哪一種濃度的流體，在不同的流量下的  $T_b$  差距都不大，本研究判斷這是因為對於實驗所設計的負載量水已經足夠應付，但仍然可以從實驗結果中看到奈米流體較水有更低的  $T_b$  且隨著濃度的提高有更佳的趨勢，因此不同樣本之間的性能比較將依賴後續計算的熱交換量、熱交換器效率與 SEF，透過基本性質的量測結果來更詳細的評估各濃度的 GNNF 相對於水有多少提升。

表 4.6 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (2 LPM)

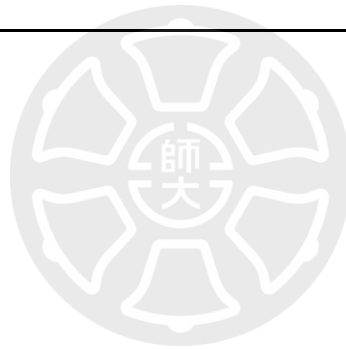
| 加熱瓦數             | 50 W             |       | 100 W |       | 150 W |       |
|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 樣本               | 加熱器接觸面溫度 Tb (°C) |       |       |       |       |       |
| 環境溫度             | 25°C             | 32°C  | 25°C  | 32°C  | 25°C  | 32°C  |
| Water            | 31.89            | 38.99 | 38.75 | 45.85 | 45.70 | 52.59 |
| GNNF<br>0.05 wt% | 31.89            | 38.73 | 38.79 | 45.58 | 45.83 | 52.80 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 31.80            | 38.85 | 38.70 | 45.64 | 45.60 | 52.85 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 31.61            | 38.67 | 38.41 | 45.40 | 45.22 | 52.20 |

表 4.7 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (3.5 LPM)

| 加熱瓦數             | 50 W             |       | 100 W |       | 150 W |       |
|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 樣本               | 加熱器接觸面溫度 Tb (°C) |       |       |       |       |       |
| 環境溫度             | 25°C             | 32°C  | 25°C  | 32°C  | 25°C  | 32°C  |
| Water            | 31.60            | 38.92 | 38.18 | 45.52 | 44.83 | 52.10 |
| GNNF<br>0.05 wt% | 31.56            | 38.82 | 38.25 | 45.44 | 44.92 | 52.24 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 31.54            | 38.78 | 38.14 | 45.49 | 44.84 | 52.19 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 31.28            | 38.64 | 37.83 | 45.02 | 44.41 | 51.85 |

表 4.8 各樣本在不同加熱瓦數下加熱器接觸面溫度 (5 LPM)

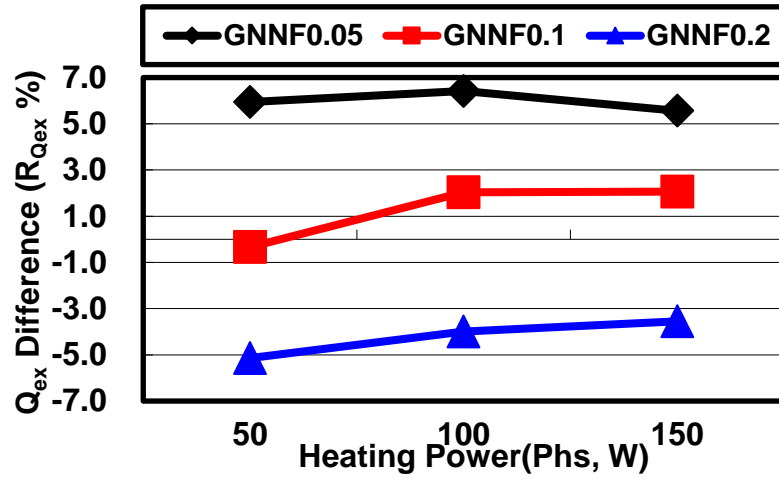
| 加熱瓦數             | 50 W                                  |                       | 100 W                 |                       | 150 W                 |                       |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 樣本               | 加熱器接觸面溫度 $T_b$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) |                       |                       |                       |                       |                       |
| 環境溫度             | 25 $^{\circ}\text{C}$                 | 32 $^{\circ}\text{C}$ | 25 $^{\circ}\text{C}$ | 32 $^{\circ}\text{C}$ | 25 $^{\circ}\text{C}$ | 32 $^{\circ}\text{C}$ |
| Water            | 31.40                                 | 38.84                 | 37.90                 | 45.34                 | 44.37                 | 51.82                 |
| GNNF<br>0.05 wt% | 31.50                                 | 38.83                 | 37.91                 | 45.38                 | 44.43                 | 52.12                 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 31.24                                 | 38.91                 | 37.60                 | 45.34                 | 44.11                 | 52.08                 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 31.10                                 | 38.61                 | 37.53                 | 45.22                 | 43.95                 | 51.79                 |



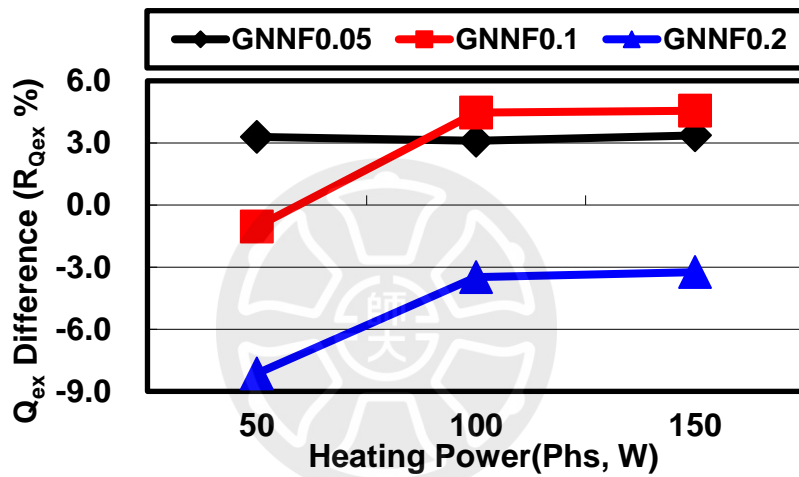
#### 4.4.2 熱交換量分析

熱交換量 ( $Q_{ex}$ ) 在散熱研究中是最被廣泛討論的性質， $Q_{ex}$  的多寡往往決定工作流體的散熱性能高低，本實驗結果以水作為基準值將各樣本的  $Q_{ex}$  轉換為提升率的形式 ( $R_{Q_{ex}}$ ) 其相關的實驗結果如圖 4.13、4.14 所示，從圖中可以看到在環境溫度  $25^{\circ}\text{C}$  時  $R_{Q_{ex}}$  在 GN 濃度 0.05 wt% 的時候最高，而在環境溫度  $32^{\circ}\text{C}$  時 GN 濃度 0.1 wt% 的樣本則具有最佳的  $R_{Q_{ex}}$ ，因此可以判斷較高的 GN 濃度在較高的環境溫度下具有更佳的性能，但考慮到計算  $Q_{ex}$  時需考量到工作流體的密度與比熱等等性質，並非一味提高奈米流體的濃度便能獲得更佳熱交換性能，無論是濃度對穩定性造成的影響抑或是添加的分散劑造成基本性質的不同都可能對  $Q_{ex}$  有不同的影響，因此在取得各種因素之間的平衡點才能找出最適合的工作濃度。

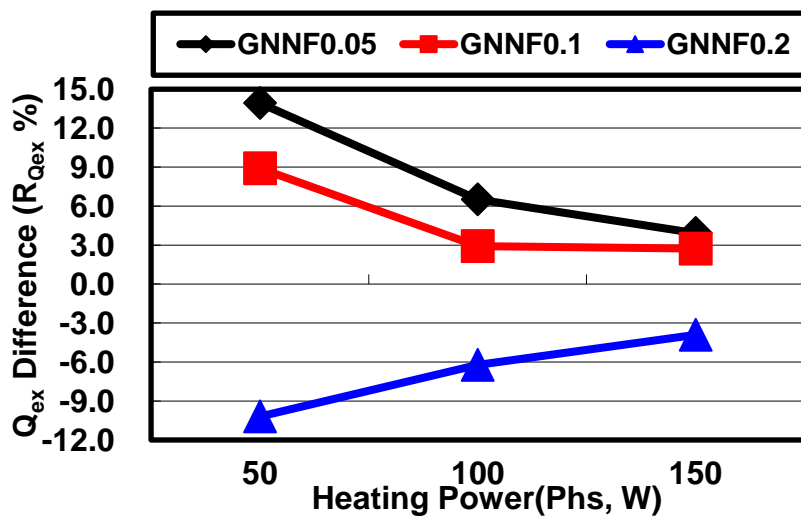




(a)

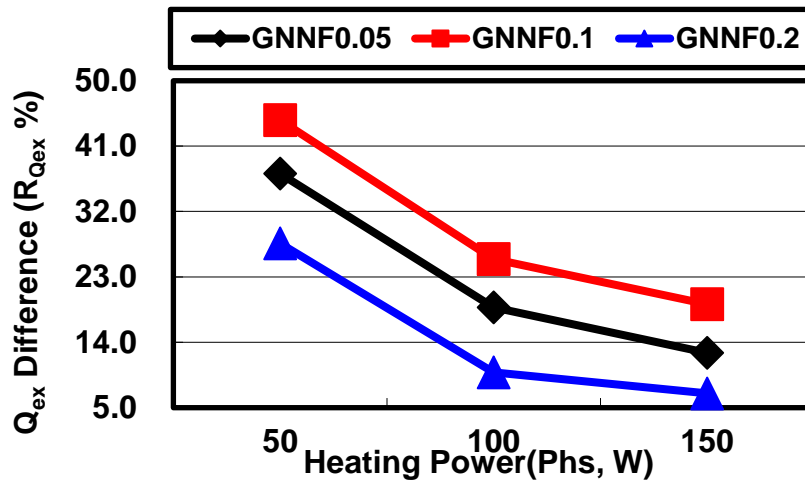


(b)

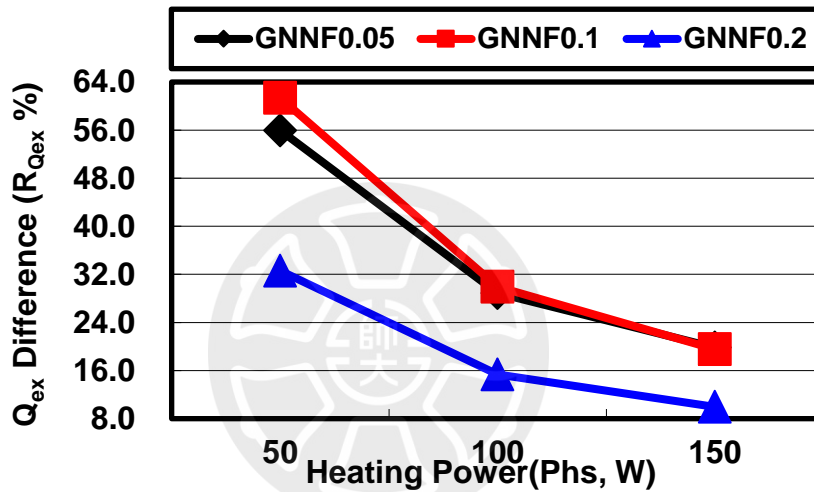


(c)

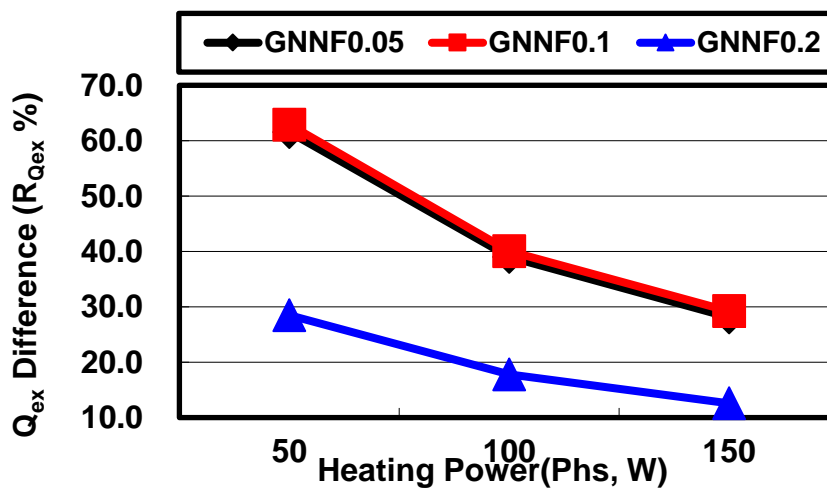
圖 4.13 樣本於 25°C 的  $R_{Qex}$  ; (a) 2 LPM, (b) 3.5 LPM, (c) 5 LPM



(a)



(b)



(c)

圖 4. 14 樣本於 32°C 的  $R_{Q_{ex}}$  ; (a) 2 LPM, (b) 3.5 LPM, (c) 5 LPM

#### 4.4.3 熱交換器效率分析

為了評估使用 GNNF 作為工作流體對熱交換器效率( $\eta$ )的提升，本研究利用式 3.7 將  $Q_{ex}$  與無紙式記錄儀記錄下的加熱功率進行計算，越高的  $\eta$  代表使用此種奈米流體可以提高更多散熱能力，本實驗以水作為基準值計算各樣本  $\eta$  的差異百分比 ( $R_\eta$ )，圖 4.15 至圖 20 為經過計算後各濃度的 GNNF 在不同加熱瓦數下的  $\eta$  提升率，可以從圖中看到在環境溫度 25°C 時 0.05 wt% 的 GNNF 在多數實驗參數下具有最高的  $\eta$ ，但在環境溫度 32°C 時 GN 濃度 0.1 wt% 的實驗流體有更優於 0.5 wt% 的  $\eta$ ，因此從分析結果來看  $\eta$  與  $Q_{ex}$  具有相同趨勢，在較高工作溫度的情況下較高濃度的 GNNF 有較好的散熱性能。

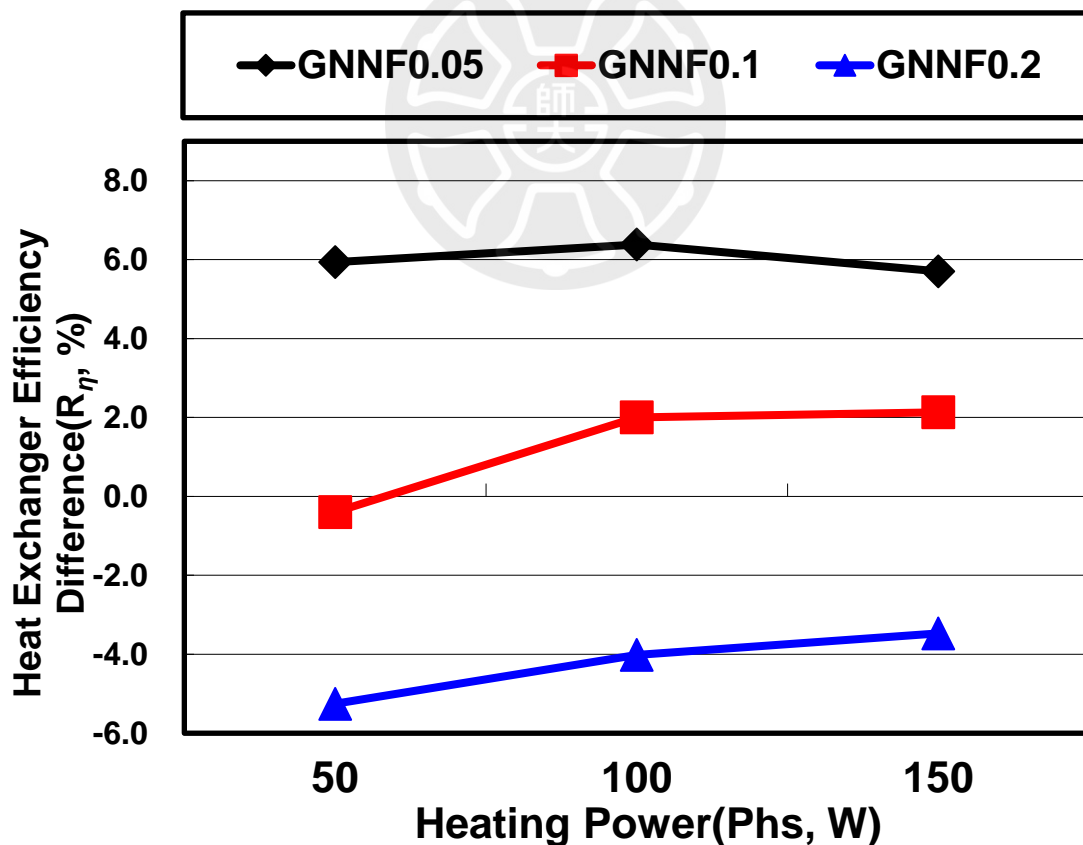


圖 4.15 GNNF 在 25°C 下的  $R_\eta$  (2 LPM)

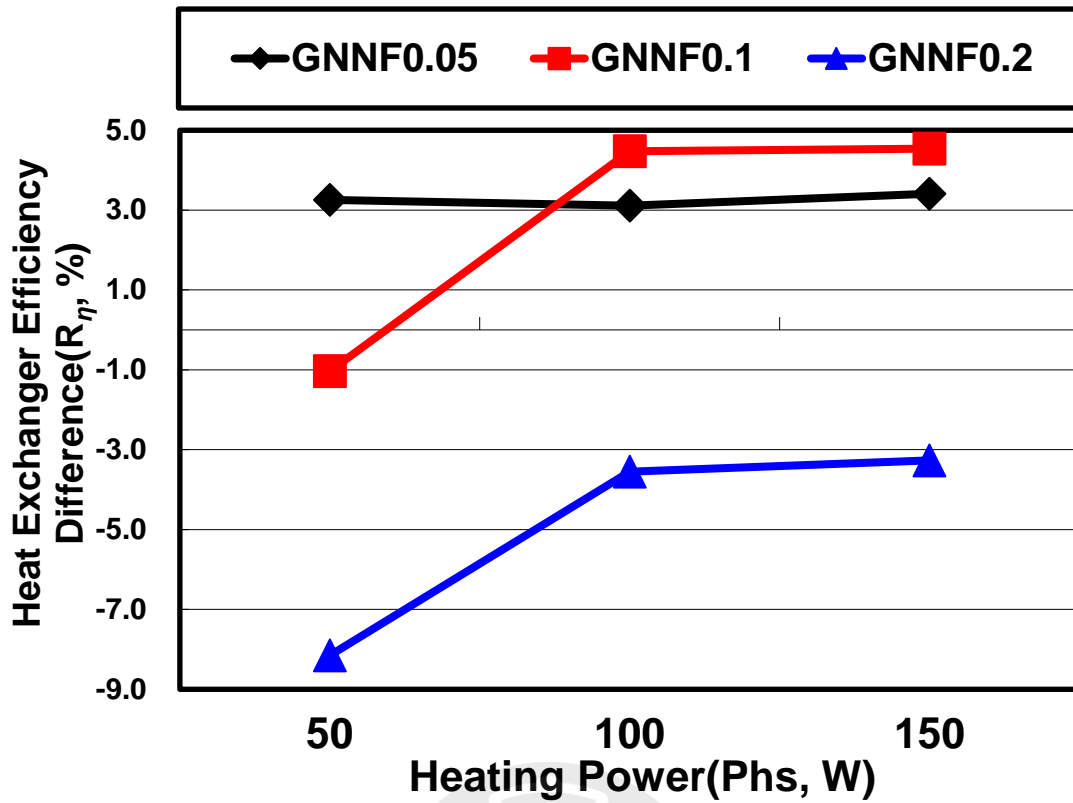


圖 4. 16 GNNF 在 25°C 下的  $R_\eta$  (3.5 LPM)

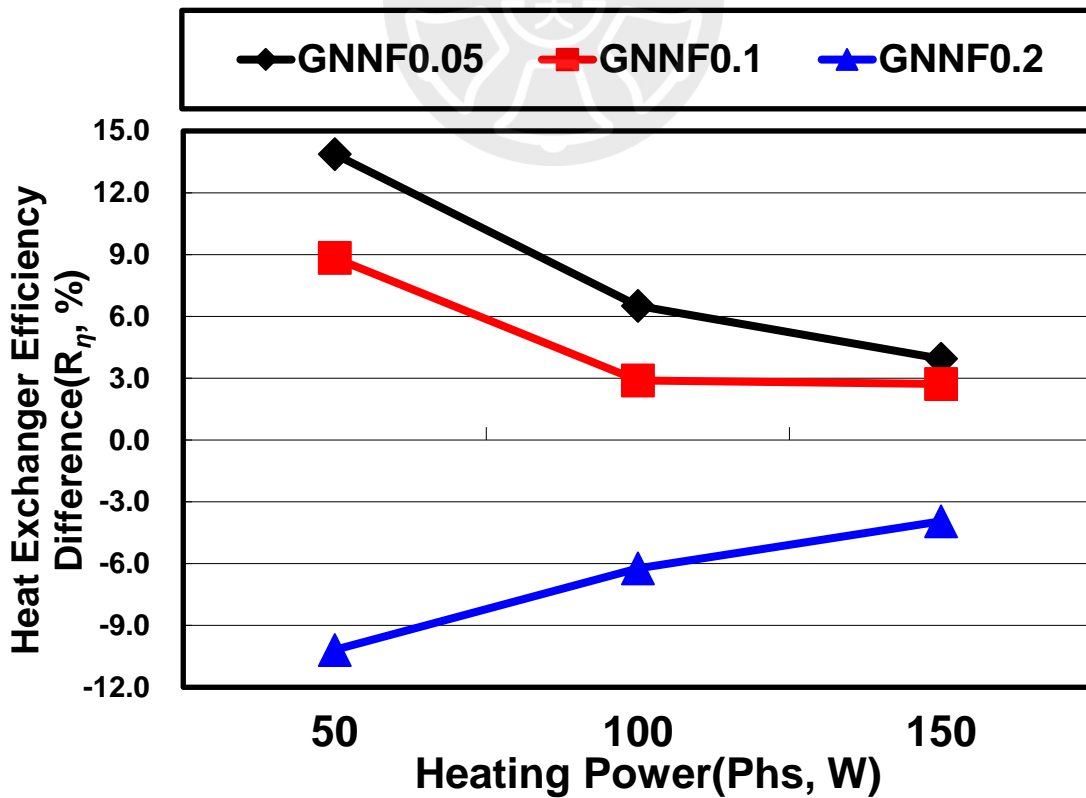


圖 4. 17 GNNF 在 25°C 下的  $R_\eta$  (5 LPM)

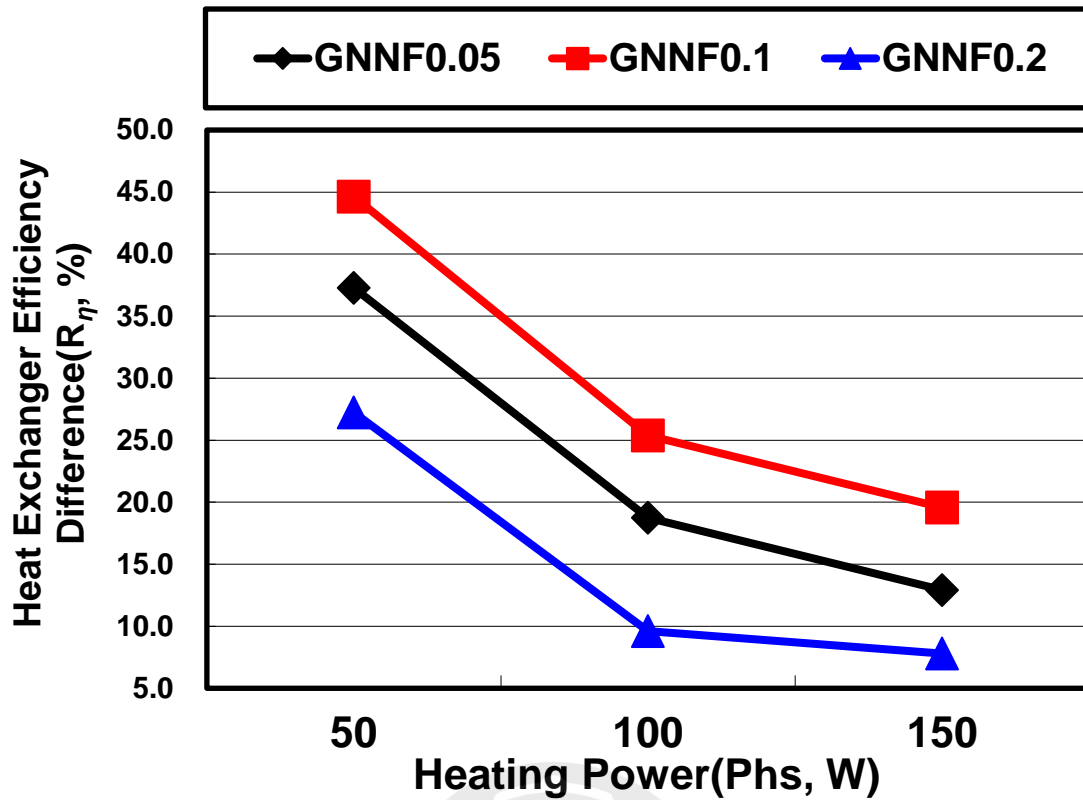


圖 4.18 GNNF 在 32°C 下的  $R_{\eta}$  (2 LPM)

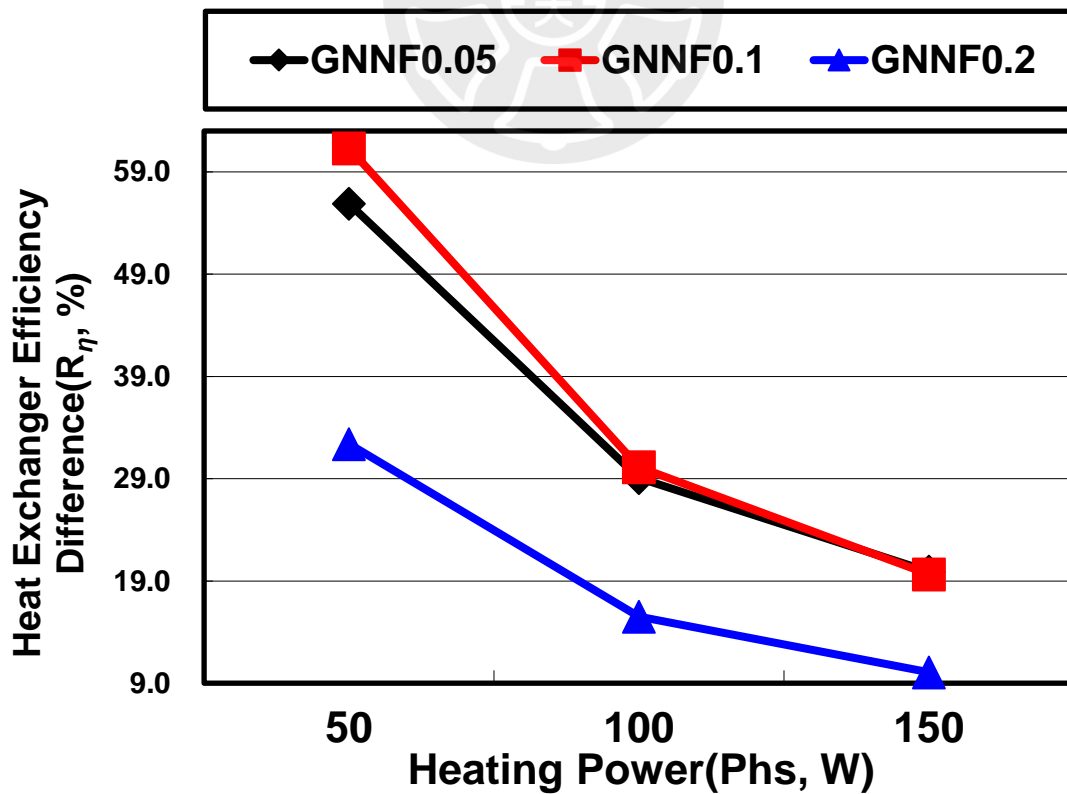


圖 4.19 GNNF 在 32°C 下的  $R_{\eta}$  (3.5 LPM)

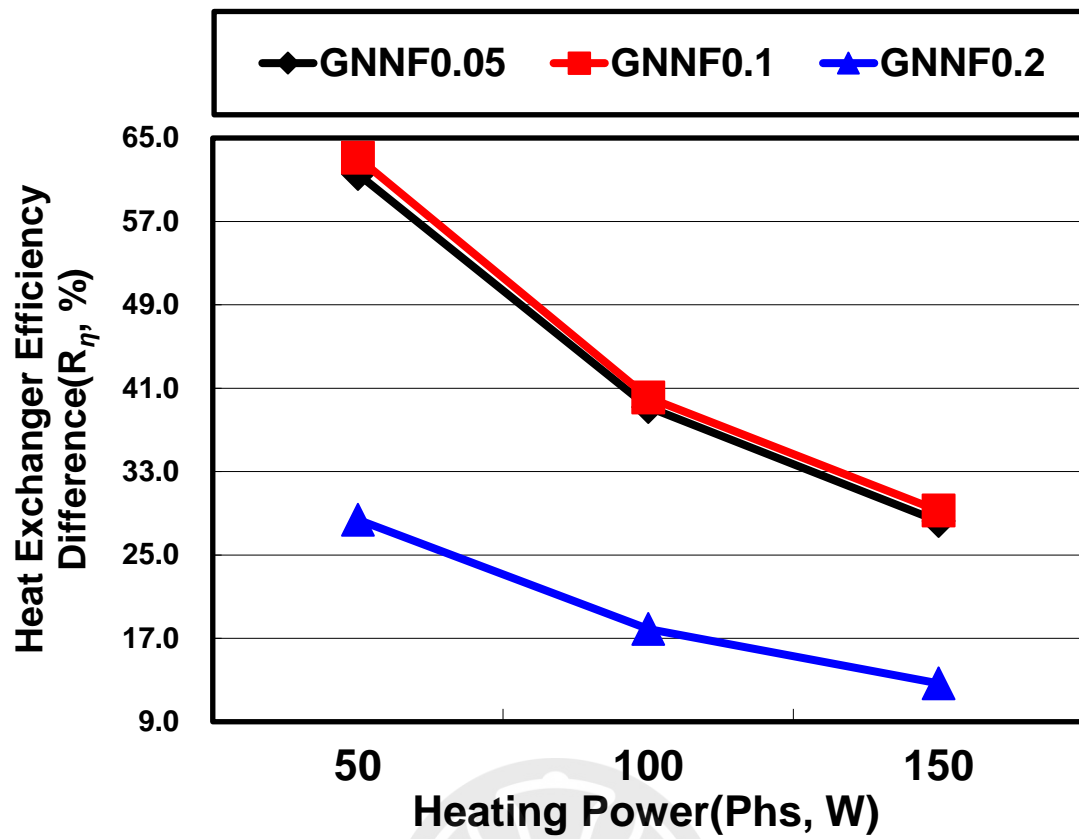


圖 4.20 GNNF 在 32°C 下的  $R_{\eta}$  (5 LPM)

#### 4.4.4 系統效率常數分析

本研究將工作流體替換成 GNNF 用以提升水冷系統的散熱性能，但也因為奈米流體較高的黏度造成系統有較高的流功，水冷系統也會隨之有較高的消耗功率，因此本研究設定了一項系統效率常數(SEF)且計算方式如式 3.8 所示，將系統的消耗功率考慮列入評估 GNNF 的參數之一，確保因濃度高低影響流功進而影響的系統電力消耗能被考慮進性能的評估標準之中，經過計算後的 SEF 結果如圖 4.21 至 4.26 所示，可以從圖中看到與  $\eta$  有相同的趨勢，在環境溫度 25°C 時 GN 濃度 0.05 wt% 之 GNNF 具有最佳的 SEF，而環境溫度 32°C 時則是 GN 濃度 0.1 wt% 的樣本最佳，因此可以從上述的結果判斷在越高的工作溫度下濃度高的 GNNF 有較好的表現，在應用於水冷散熱相較於水是有不錯的提升的，但在應用的同時仍須濃度提高下隨之上升的黏度而造成的功耗增加，權衡消耗功率增加與熱交換量提升最終才能找到最佳的工作流體濃度，表 4.9 至表 4.11 為 SEF 之數據總覽。

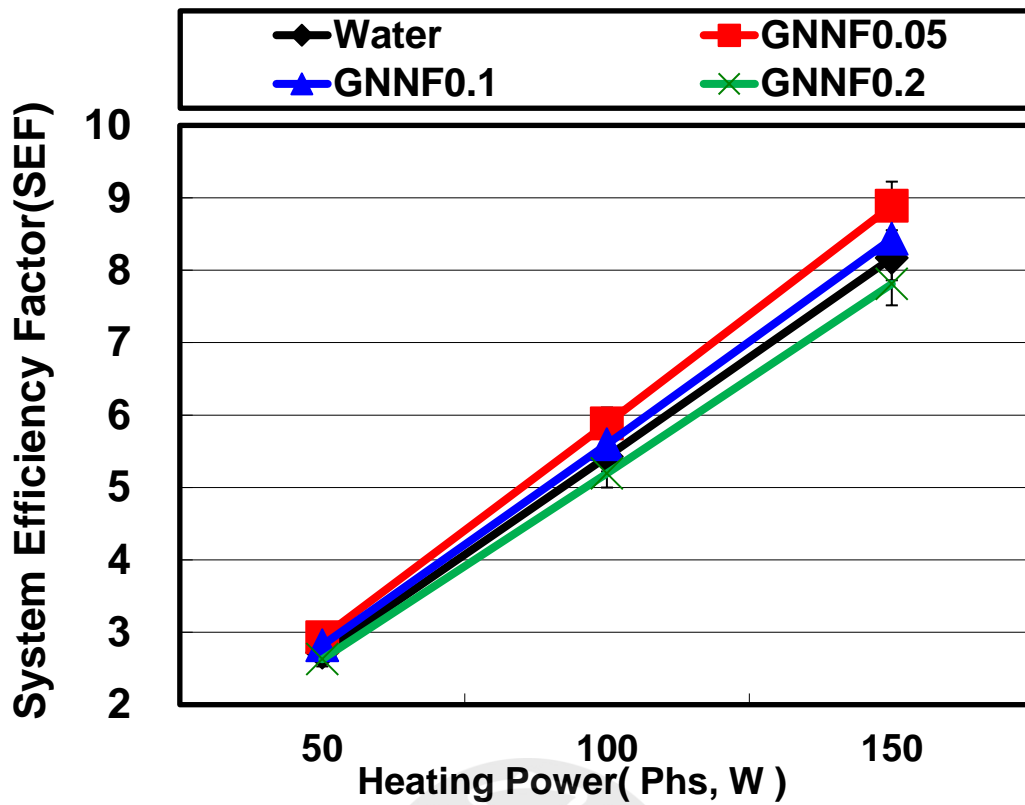


圖 4. 21 GNNF 於 25°C 的 SEF ( 2 LPM )

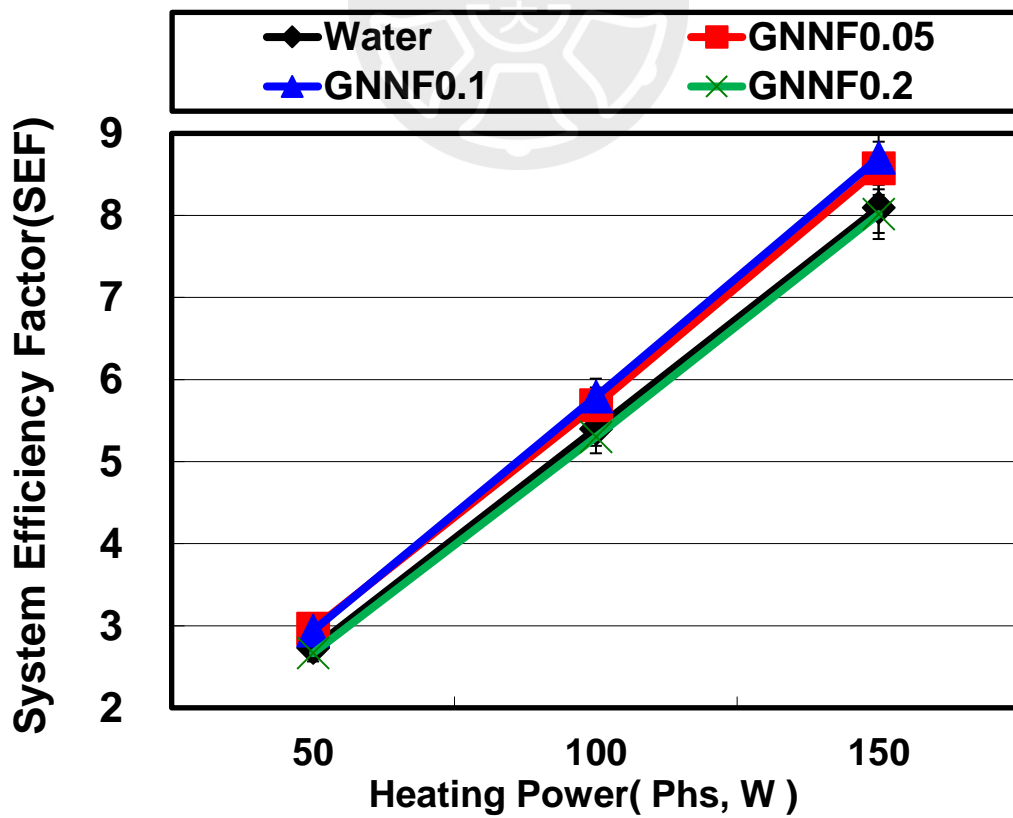


圖 4. 22 GNNF 於 25°C 的 SEF ( 3.5 LPM )

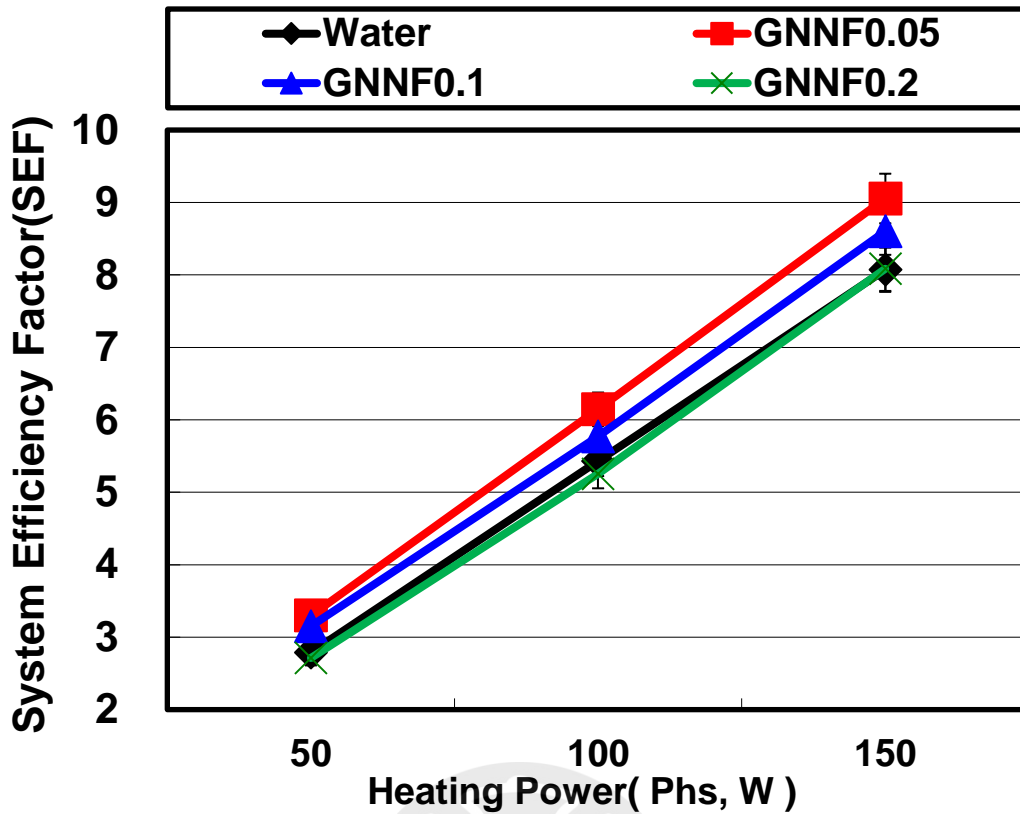


圖 4.23 GNNF 於 25°C 的 SEF (5 LPM)

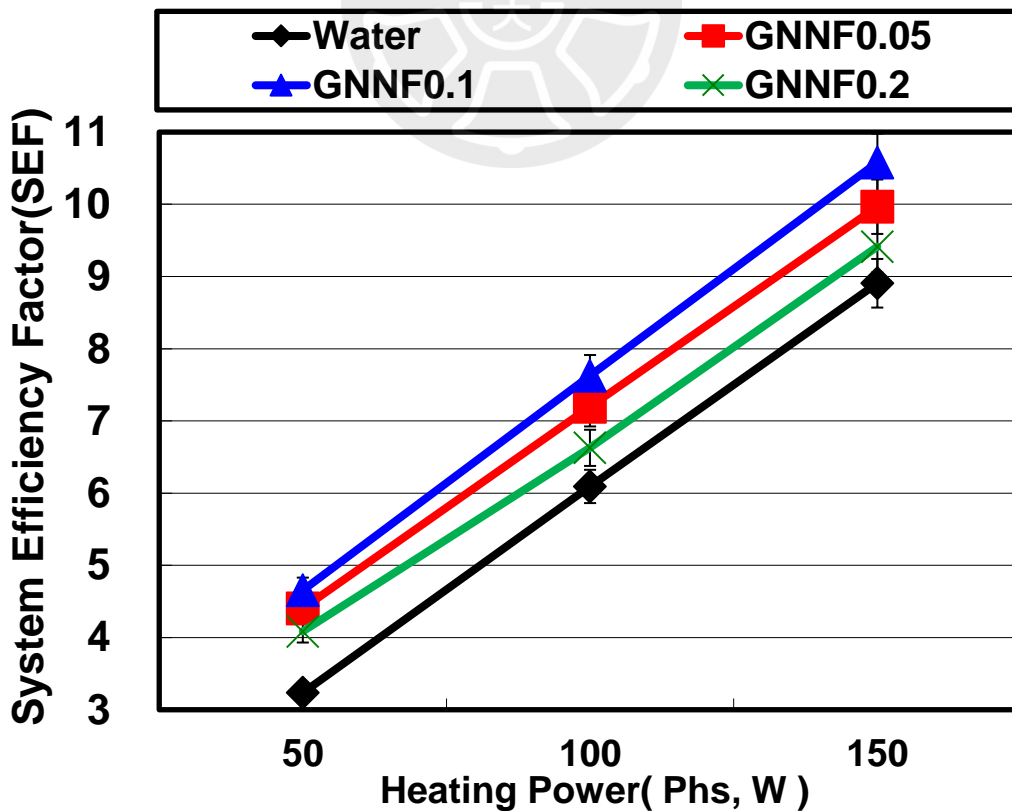


圖 4.24 GNNF 於 32°C 的 SEF (2 LPM)

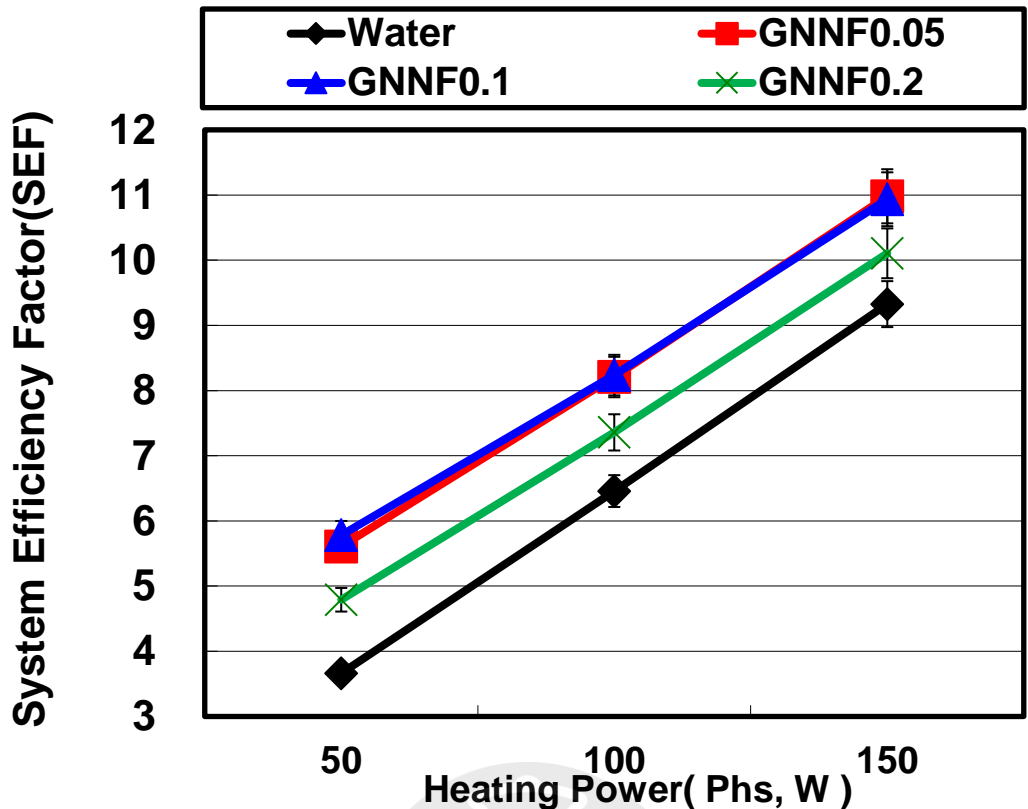


圖 4.25 GNNF 於 32°C 的 SEF (3.5 LPM)

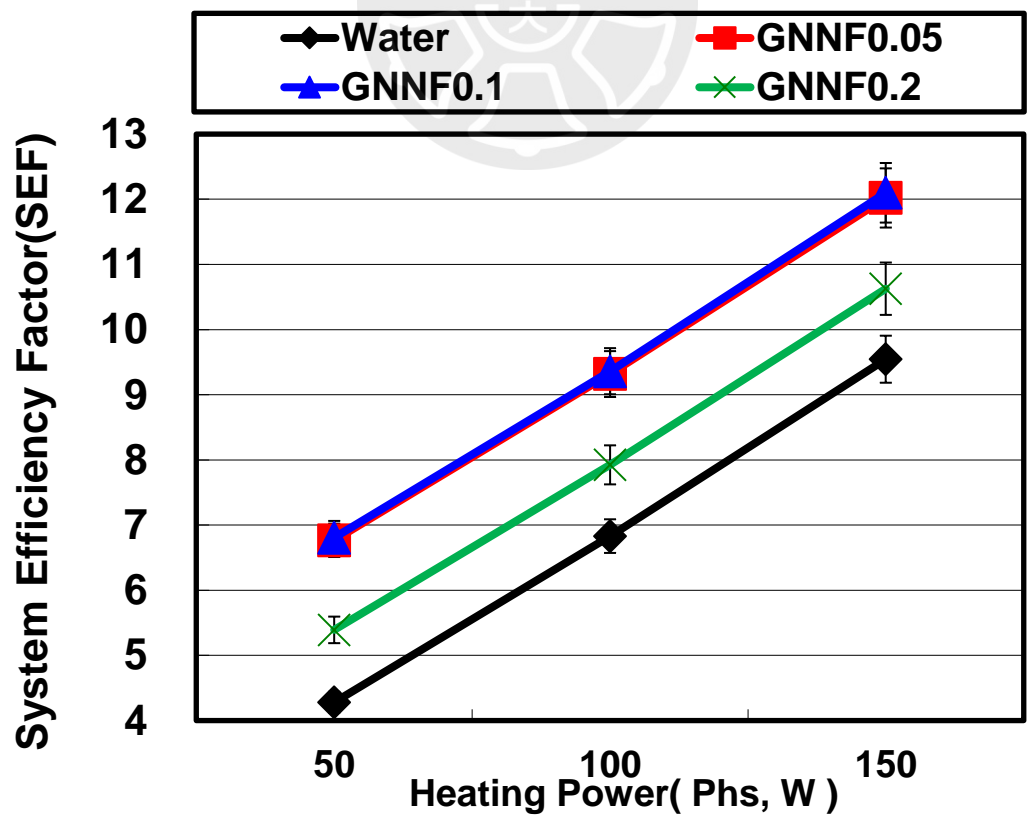


圖 4.26 GNNF 於 32°C 的 SEF (5 LPM)

表 4.9 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (2 LPM)

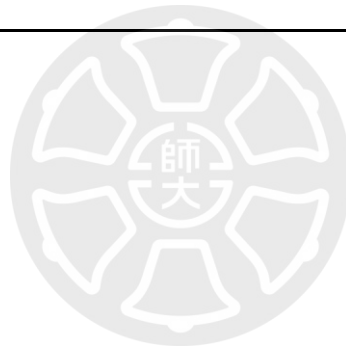
| 加熱瓦數             | 50 W |      | 100 W |      | 150 W |       |
|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 樣本               | SEF  |      |       |      |       |       |
| 環境溫度             | 25°C | 32°C | 25°C  | 32°C | 25°C  | 32°C  |
| Water            | 2.63 | 3.23 | 5.28  | 6.09 | 8.02  | 8.91  |
| GNNF<br>0.05 wt% | 2.83 | 4.40 | 5.71  | 7.20 | 8.63  | 9.97  |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 2.63 | 4.65 | 5.40  | 7.62 | 8.23  | 10.58 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 2.46 | 4.08 | 5.00  | 6.63 | 7.62  | 9.41  |

表 4.10 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (3.5 LPM)

| 加熱瓦數             | 50 W |      | 100 W |      | 150 W |       |
|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 樣本               | SEF  |      |       |      |       |       |
| 環境溫度             | 25°C | 32°C | 25°C  | 32°C | 25°C  | 32°C  |
| Water            | 2.62 | 3.66 | 5.24  | 6.46 | 7.98  | 9.33  |
| GNNF<br>0.05 wt% | 2.76 | 5.61 | 5.49  | 8.21 | 8.40  | 10.98 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 2.62 | 5.78 | 5.53  | 8.24 | 8.43  | 10.93 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 2.38 | 4.79 | 4.98  | 7.36 | 7.62  | 10.11 |

表 4.11 各樣本在不同加熱瓦數下的 SEF (5 LPM)

| 加熱瓦數             | 50 W |      | 100 W |      | 150 W |       |
|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 樣本               | SEF  |      |       |      |       |       |
| 環境溫度             | 25°C | 32°C | 25°C  | 32°C | 25°C  | 32°C  |
| Water            | 2.46 | 4.28 | 5.12  | 6.83 | 7.84  | 9.55  |
| GNNF<br>0.05 wt% | 2.86 | 6.77 | 5.52  | 9.32 | 8.28  | 12.02 |
| GNNF<br>0.1 wt%  | 2.72 | 6.81 | 5.34  | 9.36 | 8.18  | 12.10 |
| GNNF<br>0.2 wt%  | 2.19 | 5.39 | 4.75  | 7.92 | 7.48  | 10.63 |





## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本論文利用機械剝離法獲取的 GN 奈米顆粒製備 GNNF，並針對流體之分散性、基本性質與應用層面的性能進行分析與探討，最後歸納重點結論如下：

1. 在 GNNF 的製備中，眾多的分散劑由 SDS 為最佳的分散劑選擇，並且經過靜態靜置法與吸收光譜的量測，得出與 GN 濃度呈現 1：2 為兩者之間的最佳比例。
2. GNNF 的黏度與密度具有相同的趨勢，隨著溫度的上升而下降且反之會隨著濃度上升跟著上升，而 GNNF 的比熱會受到奈米顆粒與分散劑的影響，原則上比熱將會隨著 GN 的濃度提升也隨之提升，但研究結果顯示 0.05 wt% 的 GNNF 具有最高的比熱且 0.2 wt% 則最低，本研究判斷這是因為分散劑對於比熱的下降影響於高濃度時超越 GN 的上升影響，造成 0.2 wt% 之樣本的比熱甚至較水還低。
3. 在雷諾數的分析中 0.05 wt% 的 GNNF 具有第二高的雷諾數，在流體性質中越高的雷諾數代表越紊亂的流動狀態，在管內的劇烈擾動將帶動熱交換效率的提升，因此是熱交換流體的優良選擇。
4. 在紐塞數的分析中顯示隨著溫度與加熱瓦數的提升紐塞數也會隨之提升，並且有濃度越高紐塞數越低的趨勢，但在本研究的實驗條件下紐塞數的變化並不明顯。
5. 在本研究的實驗參數設計下，無論何種工作流體都能將加熱器的接觸面降至相差無幾的溫度，因為無論何種流體都足以應付本實驗給予的負載量。
6. 在熱交換應用實驗中，0.05 wt% 的 GNNF 具有在高流量低瓦數的

參數下且環境溫度 25°C 時最高的熱交換量提升率，與作為基準水做比較在 50 W/5 LPM 的參數下提升了約 13.9%，而 0.1 wt% 的 GNNF 則在環境溫度 32°C 時有最高 62.9% 的提升率。

7. 將熱交換量與加熱瓦數進行分析後得出的熱交換器效率分析中，0.05 wt% 的 GNNF 同樣於環境溫度 25°C 時具有最高的性能，並且與熱交換量具有相同的趨勢，於 50 W/5 LPM 時具有最高的提升幅度，相較於水大約提升了 15.2% 的熱交換效率，而在環境溫度 32°C 時則是濃度 0.1 wt% 的 GNNF 有最佳 63.1% 的提升。
8. 綜合熱交換量與消耗功率可以計算出使用 GNNF 的系統效率常數 (SEF)，從研究結果可以看到 0.05 wt% 的 GNNF 在 25°C 的環境溫度下有最佳的 SEF，而將環境溫度提升至 32°C 後 0.1 wt% 的 GNNF 則有最高的 SEF 值。

綜合以上幾點可以預期，在環境溫度較低的 25°C 情況下 GNNF 中最佳的濃度為 0.05 wt%，而在環境溫度較高的 32°C 時候則是 0.1 wt% 更佳，並且在電子晶片散熱的領域上有相當程度的潛力。

## 5.2 建議

本研究製備的 GNNF 對於電子晶片的散熱具有不錯的性能提升，但在研究的過程中依然有許多可以更進一步的分析探討與能夠改進的方向，能夠在未來其他研究者進行 GNNF 的研究時作為參考。

本研究相關的後續研究建議如下：

1. GN 因其片狀的結構在水中較難分散，SDS 雖然作為目前為止多數研究 GN 採用的分散劑，但分散性仍然有待增進。
2. 從實驗結果中可以看到各個樣本散熱實驗後的  $T_b$  並無明顯的差異，但仍然可以從中看出些許的趨勢，因此為了得到更佳明確的差異在未來的研究中提高熱交換實驗的負載是可行的方向。
3. GNNF 於高溫下是否能夠維持良好的分散性與極高溫下是否有良好的工作效率為未來能夠持續進行研究的部分。





## 參考文獻

- [1] W. Li, Y. Wang, and C. Zou, “ Stability, thermal conductivity and supercooling behavior of novel  $\beta$ -CD-TiO<sub>2</sub>-Ag cooling medium-based nanofluids for eco-friendly cold thermal energy storage,” *J. Clean. Prod.*, vol. 259, pp. 121162, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121162.
- [2] T. Balaji *et al.*, “ Enhanced heat transfer characteristics of water based hybrid nanofluids with graphene nanoplatelets and multi walled carbon nanotubes,” *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 1141–1157, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.09.014.
- [3] V. Selvaraj and H. Krishnan, “ Graphene-silver alloyed quantum dots nanofluid: Synthesis and application in the cooling of a simulated electronic system,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 187, no. June 2020, pp. 116580, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116580.
- [4] N. Zheng *et al.*, “ The effects of ultrasonication power and time on the dispersion stability of few-layer graphene nanofluids under the constant ultrasonic energy consumption condition,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 80, pp. 105816, 2021, doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105816.
- [5] C. J. Ho *et al.*, “ Experimental study on cooling performance of water-based hybrid nanofluid with PCM and graphene nanoparticles,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 33, no. January, pp. 101939, 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101939.
- [6] S. Dayou *et al.*, “ Comparison of heat transfer performance of water-based graphene nanoplatelet- and multi-walled carbon nanotube-nanofluids in a concentric tube heat exchanger,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 125, no. March,

- pp. 108976, 2022, doi: 10. 1016/ j. diamond. 2022. 108976.
- [7] J. Zhou *et al.*, “ Comprehensive evaluation of graphene/R141b nanofluids enhanced heat transfer performance of minichannel heat sinks,” *Powder Technol.*, vol. 397, pp. 116997, 2022, doi: 10. 1016/ j. powtec. 2021. 11. 041.
- [8] Y. Gao *et al.*, “ Numerical investigation of aqueous graphene nanofluid ice slurry passing through a horizontal circular pipe: Heat transfer and fluid flow characteristics,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 134, no. April, pp. 106022, 2022, doi: 10. 1016/ j. icheatmasstransfer. 2022. 106022.
- [9] B. C. Brodie, “ on the atomic weight of graphit,” 1858.
- [10] K. S. Novoselov *et al.*, “ Materials and Methods: Electric field effect in atomically thin carbon films.,” *Science*, 2004.
- [11] M. Burghard, “ Electronic and vibrational properties of chemically modified single- wall carbon nanotubes,” *Surface Science Reports*, 2005, doi: 10. 1016/ j. surfrep. 2005. 07. 001.
- [12] M. F. L. DeVolder *et al.*, “ Carbon nanotubes: Present and future commercial applications,” *Scienc*, 2013, doi: 10. 1126/ science. 1222453.
- [13] E.V. Castro *et al.*, “ Biased bilayer graphene: Semiconductor with a gap tunable by the electric field effect,” *Phys. Rev. Lett.*, 2007, doi: 10. 1103/ PhysRevLett. 99. 216802.
- [14] A. K. Geim and K. S. Novoselov, “ The rise of graphene,” *Nat. Mater.*, 2007, doi: 10. 1038/ nmat1849.
- [15] W. Yu and H. Xie, “ A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications,” *Journal of Nanomaterials*, 2012, doi: 10. 1155/ 2012/ 435873.

- [16] G. Dombek, Z. Nadolny, and P. Przybyłek, “ The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO<sub>2</sub> and C<sub>60</sub>,” 2014, doi: 10.1109/ICHVE.2014.7035466.
- [17] M. V. Avdeev *et al.*, “ On the magnetic structure of magnetite/ oleic acid/ benzene ferrofluids by small-angle neutron scattering,” *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, doi: 10.1016/j.jmmm.2003.08.032.
- [18] R. Taylor *et al.*, “ Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids,” *Journal of Applied Physics*. 2013, doi: 10.1063/1.4754271.
- [19] A. Ghadimi *et al.*, “ A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
- [20] S. Chakraborty and P. K. Panigrahi, “ Stability of nanofluid: A review,” *Applied Thermal Engineering*, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115259.
- [21] O. Mahian *et al.*, “ Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows- Part I: Fundamentals and theory,” *Physics Reports*, 2019, doi: 10.1016/j.physrep.2018.11.004.
- [22] F. Yu *et al.*, “ Dispersion stability of thermal nanofluids,” *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, doi: 10.1016/j.pnsc.2017.08.010.
- [23] N. Ali *et al.*, “ A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties,” *Journal of Nanomaterials*, 2018, doi: 10.1155/2018/6978130.
- [24] S. Umar *et al.*, “ Investigation of the effect of pH adjustment on the stability

- of nanofluid,” 2018, doi: 10. 1063/ 1. 5066987.
- [25] S. Ravindran *et al.*, “ Understanding how the properties of whey protein stabilized emulsions depend on pH, ionic strength and calcium concentration, by mapping environmental conditions to zeta potential,” *Food Hydrocoll.*, 2018, doi: 10. 1016/ j. foodhyd. 2017. 12. 003.
- [26] S. Mukherjee *et al.*, “ Stability of Heat Transfer Nanofluids – A Review,” *ChemBioEng Reviews*, 2018, doi: 10. 1002/ cben. 201800008.
- [27] E. Piacenza *et al.*, “ Stability of biogenic metal(loid) nanomaterials related to the colloidal stabilization theory of chemical nanostructures,” *Critical Reviews in Biotechnology*, 2018, doi: 10. 1080/ 07388551. 2018. 1440525.
- [28] K. Manojkumar *et al.*, “A short review on stable metal nanoparticles using ionic liquids, supported ionic liquids, and poly(ionic liquids),” *Journal of Nanoparticle Research*, 2016, doi: 10. 1007/ s11051- 016- 3409- y.
- [29] A. Amiri *et al.*, “ Pool boiling heat transfer of CNT/ water nanofluids,” *Appl. Therm. Eng.*, 2014, doi: 10. 1016/ j. applthermaleng. 2014. 06. 064.
- [30] J. Tavares and S. Coulombe, “ Dual plasma synthesis and characterization of a stable copper- ethylene glycol nanofluid,” *Powder Technol.*, 2011, doi: 10. 1016/ j. powtec. 2011. 03. 006.
- [31] R. M. Mostafizur *et al.*, “ Effect of surfactant on stability, thermal conductivity, and viscosity of aluminium oxide– methanol nanofluids for heat transfer applications,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, pp. 101302, Apr. 2022, doi: 10. 1016/ J. TSEP. 2022. 101302.
- [32] J. Dong *et al.*, “ Experimental investigation and application of stability and thermal characteristics of SiO<sub>2</sub>- ethylene-glycol/water nanofluids,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 176, pp. 107533, Jun. 2022, doi: 10. 1016/ J.

- IJTHERMALSCI. 2022. 107533.
- [33] I. A. Zakaria *et al.*, “ Heat transfer and electrical discharge of hybrid nanofluid coolants in a fuel cell cooling channel application,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 210, pp. 118369, Jun. 2022, doi: 10. 1016/ J. APPLTHERMALENG. 2022. 118369.
- [34] A. Shibata *et al.*, “ Heat transfer enhancement of graphene nanofluid manufactured from graphite sheet,” *Mater. Today Proc.*, May. 2022, doi: 10. 1016/ J. MATPR. 2022. 05. 288.
- [35] T. Venkatesh *et al.*, “ Performance enhancement of hybrid solar PV/ T system with graphene based nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 130, pp. 105794, Jan. 2022, doi: 10. 1016/ J. ICHEATMASSTRANSFER. 2021. 105794.
- [36] L. Qiu *et al.*, “ A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids,” *Physics Reports*, 2020, doi: 10. 1016/ j. physrep. 2019. 12. 001.
- [37] K. Khanafer and K. Vafai, “ A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2011, doi: 10. 1016/ j. ijheatmasstransfer. 2011. 04. 048.
- [38] Y. Xuan and W. Roetzel, “ Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2000, doi: 10. 1016/ S0017-9310(99)00369- 5.
- [39] M. Sharifpur *et al.*, “ A new model for density of nanofluids including nanolayer,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2016, doi: 10. 1016/ j. icheatmasstransfer. 2016. 09. 010.
- [40] Y. R. Sekhar and K.V. Sharma, “ Study of viscosity and specific heat

- capacity characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids at low particle concentrations,” *J. Exp. Nanosci.*, 2015, doi: 10. 1080/ 17458080. 2013. 796595.
- [41] R. S. Vajjha and D. K. Das, “ A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, doi: 10. 1016/ j. ijheatmasstransfer. 2012. 03. 048.
- [42] D. Cabaleiro *et al.*, “ Specific heat of metal oxide nanofluids at high concentrations for heat transfer,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2015, doi: 10. 1016/ j. ijheatmasstransfer. 2015. 04. 107.
- [43] R. Hentschke, “ On the specific heat capacity enhancement in nanofluids,” *Nanoscale Res. Lett.*, 2016, doi: 10. 1186/ s11671- 015- 1188- 5.
- [44] E. C. Okonkwo *et al.*, “ An updated review of nanofluids in various heat transfer devices,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, doi: 10. 1007/ s10973- 020- 09760- 2.
- [45] L. S. Sundar *et al.*, “ Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, doi: 10. 1016/ j. rser. 2013. 04. 003.
- [46] A. Sobti and R. K. Wanchoo, “ Thermal conductivity of nanofluids,” *Mater. Sci. Forum*, 2013, doi: 10. 4028/ www. scientific. net/ MSF. 757. 111.
- [47] M. M. Tawfik, “ Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, doi: 10. 1016/ j. rser. 2016. 11. 111.
- [48] M. U. Sajid and H. M. Ali, “ Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018,

doi: 10. 1016/ j. ijheatmasstransfer. 2018. 05. 021.

[49] F. Iacobazzi *et al.*, “ A critical analysis of clustering phenomenon in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2019, doi: 10. 1007/ s10973- 018- 7099- 9.

[50] I. H. Rizvi *et al.*, “ Mathematical modelling of thermal conductivity for nanofluid considering interfacial nano- layer,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, 2013, doi: 10. 1007/ s00231- 013- 1117- z.

[51]各品牌 cpu 規格。取自

<https://www.intel.com.tw/content/www/tw/zh/products/details/processors/core.html>, <https://www.amd.com/zh-hant/products/processors-desktop>.





## 符號釋義

| 符號         | 說明          | 單位   |
|------------|-------------|--|
| $T_{aexi}$ | 氣冷式熱交換器入口水溫 | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $T_{aexo}$ | 氣冷式熱交換器出口水溫 | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $T_{wexi}$ | 水冷式熱交換器入口水溫 | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $T_{wexo}$ | 水冷式熱交換器出口水溫 | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $T_h$      | 水冷式熱交換器底板溫度 | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $T_b$      | 加熱器底板溫度     | $^{\circ}\text{C}$                         |
| $F_w$      | 體積流率        | LPM  |
| $V_L$      | 負載端電壓       | V  |
| $V_S$      | 供應端電壓       | V  |
| $I_s$      | 負載電流        | A  |
| $\rho$     | 密度          | $\text{Kg}/\text{m}^3$                     |
| $\mu$      | 黏度          | $\text{Pa}\cdot\text{s}$                   |
| $C_p$      | 比熱          | $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| $k$        | 熱傳導係數       | $\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$           |
| $H$        | 熱流值         | W  |
| $H_r$      | 加熱速率        | $^{\circ}\text{C}/\text{s}$                |
| $M$        | 樣本質量        | g  |
| $Re$       | 雷諾數         | 無  |
| $V_m$      | 體積流率        | $\text{m}^3/\text{s}$                      |
| $D_h$      | 水力直徑        | m  |
| $h$        | 對流係數        | $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{k}$         |
| $Q_{ex}$   | 熱交換量        | W  |

|           |             |        |
|-----------|-------------|--------|
| $A_s$     | 熱交換器底板面積    | $m^2$  |
| $Nu$      | 紐塞數         | 無      |
| $\eta$    | 熱交換器效率      | %      |
| $P_h$     | 加熱功率        | W      |
| $P_e$     | 消耗功率        | W      |
| $U_c$     | 不確定性        | %      |
| ABS       | 吸收值         | counts |
| $R_{ABS}$ | 吸收值差異百分比    | %      |
| $R_{Qex}$ | 熱交換量差異百分比   | %      |
| $R_\eta$  | 熱交換器效率差異百分比 | %      |
| SEF       | 系統效率常數      | 無      |



## 作者簡介

|      |  |     |       |
|------|--|-----|-------|
| 姓名   | 黃家慶 (Chia-Cing Huang)  | 出生地 | 臺灣臺北市 |
| 電子郵件 | [REDACTED]   |     |       |
| 聯絡地址 | 臺北市大安區和平東路一段 129 號科技與工程學院工業教育學系能源與奈米科技研究室  |     |       |
| 學歷   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 臺北市立建國高級中學</li> <li>■ 國立臺灣師範大學工業教育學系-能源應用與車輛技術組</li> <li>■ 國立臺灣師範大學工業教育學系碩士班-能源應用與車輛技術組</li> </ul>  |     |       |
| 經歷   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 擔任科技部兼任研究助理</li> <li>■ 國立臺灣師範大學工業教育學系系學會活動股股員</li> </ul>  |     |       |
| 證照   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 中華民國冷凍空調裝修技術士-丙級</li> </ul>   |     |       |
| 著作   | <p>SCI Journal:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ S.-P. Yu, Y.-F. Lue, T.-P. Teng*, H.-K. Hsieh, <b>C.-C. Huang</b>, Enhanced heat transfer performance of the tube heat exchangers using carbon-based nanofluids, Appl. Sci. 11 (2021) 8139.</li> <li>■ T.-P. Teng*, S.-P. Yu, Y.-F. Lue, Q.-L. Xie, H.-K. Hsieh, <b>C.-C. Huang</b>, Influence of far infrared TiO<sub>2</sub> and multi-walled carbon nanotubes coatings on the performance of a hot water heater, Appl. Sci. 11 (2021) 7043.</li> </ul> <p>國內研討會:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>黃家慶*</b>、鄧敦平、謝祥楷，溫度對於碳系奈米流體基本性質影響之研究，中國機械工程學會第三十八屆全國學術研討會，Paper NO. E2-010，2021。</li> <li>■ 謝祥楷*、鄧敦平、<b>黃家慶</b>，汽車空調換裝冷媒選用之研究，中國機械工程學會第三十八屆全國學術研討會，Paper NO. A12-010，2021。</li> <li>■ 鄧敦平、<b>黃家慶*</b>、謝祥楷，奈米碳冷凍油之抗磨耗性能</li> </ul> |     |       |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>研究，中國機械工程學會第三十七屆全國學術研討會，Paper NO. 580，pp. 3591-3596，2020。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ 鄧敦平、謝祥楷*、<u>黃家慶</u>，遠紅外線塗料提升分離式空調機性能之研究，中國機械工程學會第三十七屆全國學術研討會，Paper NO. 584，pp. 3597-3602，2020。</li></ul> <p>研究計畫：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ 碳系奈米流體之分散系統開發、特性分析與應用研究（MOST 110-2221-E-003 -009 -MY3）。</li><li>■ 太陽能集熱流體與塗層研製、特性分析與應用研究（MOST 109-2221-E-003-002-）。</li><li>■ 遠紅外線塗料提升熱傳性能分析與節能應用研究（MOST 106-2221-E-003 -024 -MY3）。</li><li>■ 高壓燃燒法製備微/奈米碳系材料與工作流體及其應用研究（MOST 106-2221-E-003 -021 -MY3）。</li></ul> |
|--|---|

