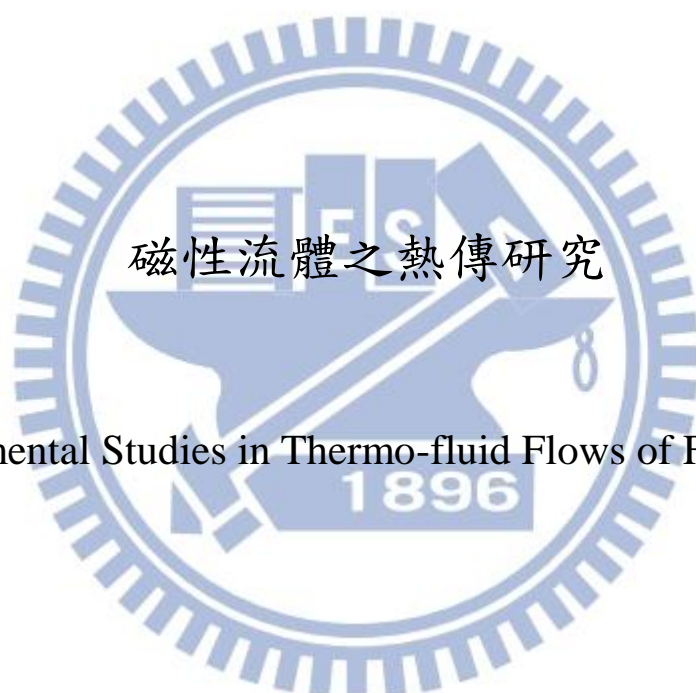


# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



研究生：王隆福

指導教授：陳慶耀 博士

中華民國一百零一年七月

磁性流體之熱傳研究

Experimental Studies in Thermo-fluid Flows of Ferrofluids

研究生：王隆福

Student : Lung -Fu Wang

指導教授：陳慶耀

Advisor : Ching-Yao Chen



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of The Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

# 磁性流體之熱傳研究

學生:王隆福

指導教授:陳慶耀

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本文研究磁性流體在管流中的熱傳行為，本實驗結合磁性流體與奈米熱傳，試以改變磁性流體的體積分率與流場中的雷諾數，探討磁性奈米流體之基本性質以及提高流體熱傳性質。在實驗中可以發現，增加流場中的雷諾數與磁性流體的體積分率對於磁性流體的熱傳係數的確有所提升，所得到實驗數據相當符合與文獻中的經驗公式。此外，利用法拉第電磁感應原理，因激磁線圈通於交流電而產生時變之磁通量，使磁性流體通過此時變均勻磁場時產生感應訊號，藉由改變磁性流體之體積分率以及溫度，產生多組感應電壓之訊號並作分析及比較。

關鍵字：磁性流體，奈米熱傳，感應電壓。

## 誌謝

就讀這兩年的碩士班過程中，首先是感謝老師陳慶耀教授的指導，在做研究及學習的過程中適時的指引方向，以及當學生遇到挫折及瓶頸時給予意見，並且在課業上以及人生方向上給予教導與鼓勵，讓學生在研究期間得以依進度循序漸進，使學生能夠克服困難且不放棄的持續進步，而完成整篇論文。在生活上，分享自身的經歷，使學生更懂得與人相處之道以及學習更多的時間管理方法。

此外，還要感謝學長姐的彥宏、裕盛、聖焱、合慶、琦雯、國安、文良、世聰、杰民在我碩士過程中對實驗儀器教導以及理論分析上的教學和對環境上的熟悉，以及同窗好友的彥志、育辰、定弘在操作實驗以及撰寫論文過程中所給予的幫忙，並且在這兩年的相處中愉快的度過，以及學弟妹皓中、佩玲、開俊在實驗的幫忙以及辛勞的舉辦活動使複雜性流體實驗室大家之間感情更加融洽，還有大學朋友及其它實驗室的大家能夠一起討論功課以及一起放鬆心情。

最後，莫過於父母親對我的養育之恩和栽培，以及家人的支持與關心，而得以完成碩士學業；此外，尚有許多曾幫助過我的人，雖無法盡舉，在此獻上最誠摯的敬意和謝意，所有感激無法言喻，僅以此論文獻給我所有感謝的人。

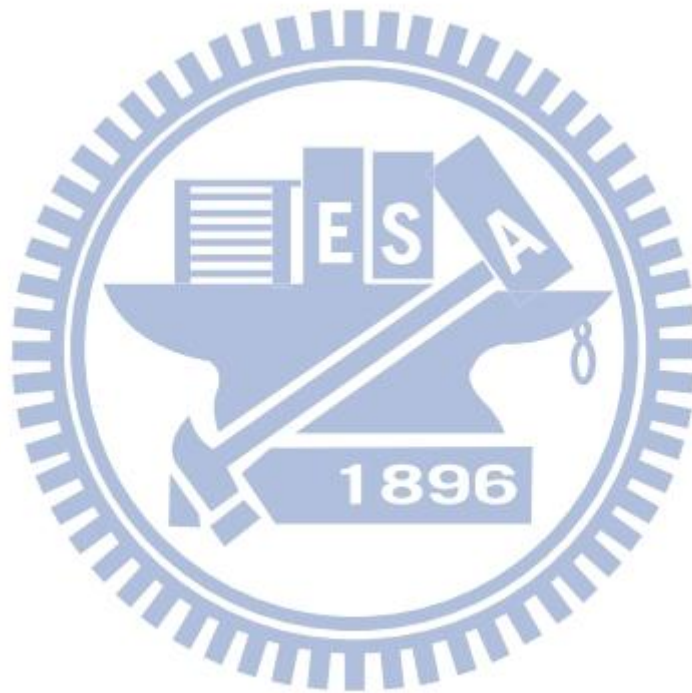
# 目錄

摘要	i
誌謝	ii
目錄	iii
表目錄	v
圖目錄	vi
符號說明	xi
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	4
1-3 研究動機及目的	8
第二章 實驗原理、設備及方法	23
2-1 實驗儀器及說明	23
2-2 實驗步驟	24
2-2-1 奈米流體熱傳	24
2-2-2 電磁轉換	25
2-3 理論背景	26

2-3-1	奈米流體熱傳 .....	26
2-3-2	電磁轉換 .....	27
<b>第三章 結果與討論 .....</b>		<b>32</b>
<b>3-1</b>	<b>磁性流體之熱傳行為 .....</b>	<b>32</b>
3-1-1	純水在不同 Re 下之熱傳情形 .....	32
3-1-2	磁性流體( $\Phi=0.05$ )在不同 Re 下之熱傳情形 .....	34
3-1-3	磁性流體( $\Phi=0.1$ )在不同 Re 下之熱傳情形 .....	35
3-1-4	磁性流體( $\Phi=0.2$ )在不同 Re 下之熱傳情形 .....	37
3-1-5	在相近的 Re 下，比較不同體積分率 $\Phi$ 的磁性流體之熱傳情形.....	38
<b>3-2</b>	<b>磁性流體之訊號量測 .....</b>	<b>39</b>
3-2-1	以體積分率為變數之感應電壓比較 .....	39
3-2-2	以溫度為變數之感應電壓比較 .....	40
<b>第四章 結論 .....</b>		<b>66</b>
參考文獻 .....		68

## 表目錄

表 1-1 磁性流體的製造方法 ..... 10



## 圖目錄

圖 1-1 磁性流體構成圖 .....	11
圖 1-2 不同形狀因子對於熱傳導係數比的影響.....	11
圖 1-3 奈米流體的熱傳係數隨著粒子的體積分率增加而增強 .....	12
圖 1-4 $Fe_3O_4$ 粒子在不同磁場下之鏈狀排列 .....	12
圖 1-5 不同磁場下的鐵奈米流體之熱傳導係數比.....	13
圖 1-6 利用外加磁場增強磁性流體的熱對流效應之裝置圖 .....	13
圖 1-7 增強外加磁場使磁性流體的熱對流效應增加 .....	14
圖 1-8 外加磁場不同的擺放方式.....	14
圖 1-9 磁流體受磁場之感磁情形.....	15
圖 1-10 磁性流體的磁化強度與溫度之曲線圖.....	15
圖 1-11 利用交流電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率 .....	16
圖 1-12 NICKLIN 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係 .....	16
圖 1-13 磁性流體之不同空包率與感應電壓差的關係 .....	17
圖 1-14 不同空包率所產生之磁場.....	17
圖 1-15 YAMAGUCHI ET AL 比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化 .....	18
圖 1-16 氣泡於垂直管中分布情況.....	18
圖 1-17 不同流動情況所產生之感應電壓.....	19



圖 1-18 利用兩組相同感應線圈(PICK-UP COILS)來取得訊號 .....	19
圖 1-19 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差.....	20
圖 1-20 為磁性流體(4 ML)受外力以移動(0.05 M/S)產生感應電壓(V)之時間電壓 圖 .....	21
圖 1-21 當磁液滴(0.16CC)通過一顆感應線圈時，所量測到的感應電動勢 .....	22
圖 1-22 下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取的感應電壓.....	22
圖 2-1 量測奈米熱傳與訊號轉換之裝置示意圖.....	29
圖 2-2 量測奈米熱傳與訊號轉換之裝置圖.....	29
圖 2-3 熱電耦埋設在鋁管壁上的位置圖.....	30
圖 2-4 冷卻循環水槽.....	30
圖 2-5 隔膜式幫浦.....	31
圖 2-6 交流電電源供應器 .....	31
圖 3-1 在 RE=931，純水各點溫度與時間的變化圖.....	42
圖 3-2 純水在 RE=931，不同位置的熱傳係數.....	42
圖 3-3 在 RE=1395，純水各點溫度與時間的變化圖.....	43
圖 3-4 純水在 RE=1395，不同位置下的熱傳係數.....	43
圖 3-5 在 RE=1861，純水各點溫度與時間的變化圖.....	44
圖 3-6 純水在 RE=1861，不同位置下的熱傳係數.....	44

圖 3-7 在 $Re=815$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖.....	45
圖 3-8 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在 $Re=815$ ，不同位置下的熱傳係數.....	45
圖 3-9 在 $Re=1112$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖.....	46
圖 3-10 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在 $Re=1112$ ，不同位置下的熱傳係數.....	46
圖 3-11 在 $Re=1482$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖.....	47
圖 3-12 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在 $Re=1482$ ，不同位置下的熱傳係數.....	47
圖 3-13 在 $Re=1852$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖.....	48
圖 3-14 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在 $Re=1852$ ，不同位置下的熱傳係數.....	48
圖 3-15 在 $Re=677$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖.....	49
圖 3-16 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在 $Re=677$ ，不同位置下的熱傳係數.....	49
圖 3-17 在 $Re=1015$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖.....	50
圖 3-18 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在 $Re=1015$ ，不同位置下的熱傳係數.....	50
圖 3-19 在 $Re=1353$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖.....	51
圖 3-20 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在 $Re=1353$ ，不同位置下的熱傳係數.....	51
圖 3-21 在 $Re=1690$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖.....	52
圖 3-22 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在 $Re=1690$ ，不同位置下的熱傳係數.....	52
圖 3-23 在 $Re=2028$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖.....	53
圖 3-24 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在 $Re=2028$ ，不同位置下的熱傳係數.....	53
圖 3-25 在 $Re=525$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	54

圖 3-26 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=525$ ，不同位置下的熱傳係數.....	54
圖 3-27 在 $Re=743$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	55
圖 3-28 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=743$ ，不同位置下的熱傳係數.....	55
圖 3-29 在 $Re=969$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	56
圖 3-30 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=969$ ，不同位置下的熱傳係數.....	56
圖 3-31 在 $Re=1292$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	57
圖 3-32 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=1292$ ，不同位置下的熱傳係數.....	57
圖 3-33 在 $Re=1526$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	58
圖 3-34 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=1526$ ，不同位置下的熱傳係數.....	58
圖 3-35 在 $Re=1780$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	59
圖 3-36 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=1780$ ，不同位置下的熱傳係數.....	59
圖 3-37 在 $Re=2035$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖.....	60
圖 3-38 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在 $Re=2035$ ，不同位置下的熱傳係數.....	60
圖 3-39 當 $Re=1350$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較.....	61
圖 3-40 當 $Re=1850$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較.....	61
圖 3-41 溫度對黏滯係數的影響.....	62
圖 3-42 與文獻中 SHAH EQUATION 做比較之磁性流體之平均 $NU$ 與 $Re$ 的關係圖 .....	62
圖 3-43 擷取訊號平均最大電壓示意圖.....	63

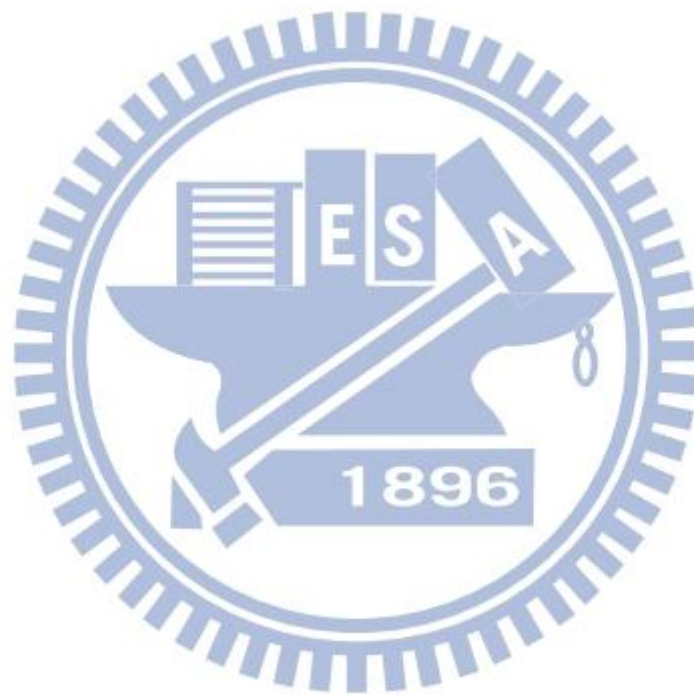
圖 3-44 APG830 在  $\Phi=0$  和  $\Phi=0.2$  的感應電壓之比較 ..... 63

圖 3-45 APG830 在  $\Phi=1$  和  $\Phi=0$  的感應電壓之比較..... 64

圖 3-46 磁性流體( $\Phi=0.1$ )不同溫度對感應電壓之影響..... 64

圖 3-47 磁性流體( $\Phi=0.2$ )不同溫度對感應電壓之影響..... 65

圖 3-48 不同體積分率下所量測的感應電壓與溫度之關係圖 ..... 65



## 符號說明

$\mu$	流體黏滯度
$\rho$	流體密度
$M_s$	磁性流體飽和磁化率
$V$	感應電動勢
$N$	線圈匝數
$\Phi_m$	磁通量
$B$	磁通量密度
$A_i$	感應有效面積
$H$	磁場強度
$M$	磁性流體磁化率或磁化強度
$h$	對流熱傳係數
$\Phi$	體積分率
$D$	圓管內徑
$L$	圓管長度
$q''$	熱通量

$Q$	熱功率
$C_p$	等壓比熱
$A$	圓管截面積
$U$	流體軸向平均速度
$T$	溫度
$Re$	雷諾數
$Nu$	紐森數
$Pr$	普郎特數



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

近年來隨著科技與電子產品小型化以及功能性的需求越來越高，熱科學與熱力工程也隨之愈進步，以致於許多人致力於熱傳強化的研究，而研究奈米流體的熱傳應用也是重點之一。早在100前，已有學者提出固液混合物能夠增強熱傳性質，因流體本身限制了其熱傳特性，添加微米級固態粒子能增加其混合物的熱傳性質；學者Birringer提出奈米流體比傳統流體更能提升熱傳性質的原因，固液混合流體有較高的熱傳系數、奈米粒子增加其碰撞管壁的機率。另外也有許多學者指出造成奈米流體增進熱傳的原因包括：固態粒子具有較大的熱傳導係數、粒子間相互碰撞導致能量傳遞、固液界面層效應及布朗運動，雖說有待於深入研究，不過奈米流體仍是極具開發潛力的熱交換工作流體。另外，奈米流體除了可應用於熱交換之外，亦可應用於塗料、鍍膜與磨潤等新技術的開發。

奈米流體是由奈米級固體粒子(直徑約為10nm~100nm)、載基流體及界面活性劑所組成，其中界面活性劑用來使粒子均勻且穩定的分散於載基流體之中，界面活性劑的好壞亦會對奈米流體產生影響，奈米流體需要有良好的穩定性才能更廣泛於工業用途，目前市面上的奈米流體種類分為金屬性的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性奈米流體、Ag奈米流體、Cu奈米流體及非金屬性的 $\text{TiO}_2$ 奈米流體，其中 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性奈米流體多作為旋轉軸密封、揚聲器軸承、真空密封及防塵密封之用途，Ag奈米流體通常用於塗料及抗菌噴劑，而Cu奈米流體通常用於抗靜電及抗電磁波，非金屬性的 $\text{TiO}_2$ 奈米流體多作為抗紫外線、塑料、油墨、塗料白潔玻璃、白潔陶瓷、空氣淨化、污水處理、化妝品及食品包裝材料之用途。

根據上述奈米流體的優點，奈米流體的應用突破電子散熱方面長久以來的問題，但現今奈米流體仍然存在著多項瓶頸，包含粒徑的大小並非越小越好，

而粒子的直徑過大也對熱傳方面不甚理想，若運用於改善熱傳則反而會增加熱阻，就熱傳改善運用而言增加到 10 奈米甚至可大幅改善熱傳之效果；另外，界面活性劑的種類各家配方皆不同，有些界面活性劑的效果不如預期，因此在長時間之下，奈米粒子往往會有沉澱或聚集的情況發生，因此反而會使得熱傳效果降低，亦會降低元件的使用壽命，如何解決以及改善奈米流體的穩定性，都將是非常值得研究的方向，也相信將是未來的發展趨勢。

磁性流體(Ferrofluid)的起源為 20 世紀，1965 年由美國航空太空總署(NASA) Papell 發明，當時美國積極征服太空，並於阿波羅計畫中首創人類登陸月球，磁性流體因而首度亮相。因為太空人在外太空時，處於真空狀態，為了讓太空衣內保持在一大氣壓，頭盔可以自由的旋轉活動，並解決外太空的失重情形，以及為了解決太空衣的問題，磁性流體的真空封件因應而生，同時也利用磁性流體來解決在外太空失重情況下，液體火箭燃料的控制。

磁性流體的組成是由懸浮於載流體中之奈米級的鐵磁微粒組合之，磁性流體組合如圖 1-1，由奈米級磁性粒子(氧化鐵粒子)、表面活化劑(surfactant)與載基流體(base fluid)組成，其奈米粒子大小約為 10 nm。磁性流體最主要的製造方法是經由化學合成的方法，將表面活性劑依附在奈米級磁性粒子上面，為了防止粒子間的吸引產生凝聚，或因重力、離心力和磁力而產生沉澱，並將其均勻溶解於水性或油性之載基流體中，使其同時具有磁性而且可流動之雙重特性。而利用此特性，有別於一般流體之較不可操控性，磁性流體則可利用外部磁場加以控制流體流動，故而磁性流體通常亦被稱為智慧型流體或功能性流體，且因其奈米級粒子尺寸，可充分使用於相關先進生物科技與微奈米流體機械系統。

美國航空太空總署科學家 Papell 將強磁性磁鐵礦(magnetite)在粉碎機中粉碎成超微粒子，再加上介面活性劑，安定分散於溶媒，形成磁性流體，其磁性顆粒不會受到磁場、凡得瓦力或重力場之作用，產生凝聚而與液體分離。將磁性



流體置於磁場中，由於磁場之作用，懸浮液中之磁性顆粒即往強磁場方向移動，同時亦帶動溶媒分子一起移動。

磁性流體的製程則可分為兩個階段，第一階段是把強磁性物質變成超微粒子或加工成超微粒子形狀的製程；第二階段是為防止強磁性超微粒子凝集，以介面活性劑包住強磁性超微粒子而分散的製程。磁性流體的製造方法除了粉碎法外，還有火花侵蝕法、共沉法、熱分解法、真空蒸發法、紫外線分解法及電著法(如表 1-1)。

磁流體現階段一般應用主要在於三大部分:(a)太空科技、(b)阻尼機制及(c)軸封技術。於太空應用中，因受無重力因素影響，傳統利用自然對流所設計之熱傳導機構(如熱管)無法有效應用，因而可使用磁性流體，並以外加磁場替代重力場產生對流效應。再者，磁流體之黏滯度會隨著外加磁場之存在而顯著增加，在常見的阻尼器中可藉由局部的磁場強度，來增大黏性效應，因而被廣泛應用為阻尼機制。而於軸封應用方面，則著眼於磁流體可為外加磁場所支持而附著於軸壁，無須如一般流體需要容器支撐，即可有效分隔軸封。

在其他未來應用方面，磁流體粒子之奈米級尺度及其於溫度變化下所產生之磁化率變化，亦可運用在新一代之電子冷卻系統，配合新近發展之微流道機構，可將原本於微流道中用於散熱用之工作流體加置磁性粒子，而利用磁性粒子吸熱產生之磁化變化現象，當溫度高於某一定值，磁性流體將不在具有磁性，附近溫度低的流體將會將其推出，而溫度下降後，磁性流體又會被吸引，將無磁性的磁性流體推出，如此流體循環之下以進行熱量傳輸，達到散熱效果。而磁性流體中的熱磁自由對流效應也遠比一般重力環境下浮力誘導的自然對流還要顯著，因此可用來加強變壓器等高功率散熱裝置的冷卻效率。同時磁性粒子因其優異之生物相容性，及其奈米特質，亦已被應用於生物醫學技術上，如細胞分離、精準釋藥與腫瘤細胞之追蹤與治療技術等。

綠色科技能源越來越受到重視，替代能源也開始被廣為研究，大家紛紛開始開發新的能源，而經由法拉第定理可知當磁液體在磁通量密度為非穩態時，可由磁生電產生感應電壓，因此能否產生感應電壓並加以利用也格外重要。本文利用電磁感應原理應用於磁流體的體積分率及溫度之量測，觀察在管流中不同參數的磁性流體通過線圈時，是否產生不同大小的感應電壓，藉此可以探討當磁性流體之濃度和溫度改變時，會對應不同感應電壓量測出來之情形。

## 1-2 文獻回顧

### 1-2-1 奈米流體熱傳

早在 1904 年，Maxwell[1]提出將微小的懸浮粒子加入流體中，有效提升流體的熱傳導係數的理論，開啟了隨後的學者研究以固液混合液來增強熱傳的研究。1962 年 Hamilton & Crosser [2]提出懸浮粒子不同的形狀與表面積，以控制粒子形狀因子改變熱傳導係數(如圖 1-2)，修正了 Maxwell 的模型，而 Xuan[3]在文獻中將鋁粒子的形狀因子對熱傳導係數作計算及比較。1995 年 Choi[4]學者首度添加奈米粒子在一般工作流體中，此流體稱之為奈米流體，進而開啟了全世界奈米流體的相關研究。

Xuan[5]等人研究奈米流體在管內中的熱傳係數及流場特性，在紊流場中，增加奈米流體中粒子的體積分率，在同一流速的情況下，熱傳係數也會有增大的趨勢(如圖 1-3)，另外量測及計算其熱傳係數與摩擦因子，並將其參數作無因次化，提出 Nusselt number 為 Reynolds number、Prandlt number、熱傳導係數比、密度與比熱乘積之函數的相關公式，此外關於奈米流體之所以能提高熱傳，Xuan 等人提出幾點主要原因：

- (1) 奈米粒子增加流體表面積與比熱。

(2) 奈米粒子會增加熱傳導係數。

(3) 因粒子間的互相作用與碰撞，能量傳遞也會更密集。

奈米流體除了添加熱傳導性質較好的 Al 和 Cu 粒子和其化合物之外，也嘗試著添加具有磁導性質的 Fe 粒子及  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子，研究 Fe 的熱傳係數[6]。此外，因鐵粒子有磁導性質，利用外加磁場使鐵粒子因受到磁場影響而產生磁化，粒子間互相吸引進而形成排列串接的情況，研究對奈米流體之熱傳導的增強。John Philip[7]等人  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  奈米流體周圍加裝磁場，發現因為具有磁性的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子因磁場產生鏈狀之排列(如圖 1-4)，因為鏈狀增加粒子之間的熱傳遞，大幅的增加熱傳導率，如圖 1-5。

除此之外，Maryamalsadat Lajvardi[8]學者等人建立一套實驗裝置來量測鐵磁流體的熱傳係數(如圖 1-6)，使鐵磁流體在層流狀態下，發現在加熱區的外側加裝磁場時會使得熱傳係數有所提升，且當提高鐵磁流體外圍的磁場大小亦會使其熱傳係數也有顯著的增加(如圖 1-7)。另外，Qiang Li[9]等學者發現，外加磁場類型的不同或是擺放方式的不同，亦會對熱傳係數產生不同的影響，如圖 1-8。

### 1-2-2 電磁轉換

磁流體與電磁鐵結合的研究方向，目前多注重於量測，其中包括液滴大小量測、流體移動速度、磁場的變化以及感應電壓大小...等。感應電壓產生之條件，其原理可由法拉第定理可知，當磁通量密度為非穩態時，方能產生感應電壓，而產生非穩態磁通量密度之因素為激磁磁場本身之非穩態性(例如輸入為交流電電流，因交流電之電流大小和方向都以週期性變化，固磁場利用右手定則時，磁場方向會因輸入電流方向而受改變)，其二為磁化影響(如磁鐵與線圈有相對運動以及磁性流體受磁場磁化之情形，圖 1-9 為磁性流體受磁場作用影響所

產生感應磁場)，最後為磁化強度的變異，如改變磁性流體之溫度時，其磁化強度皆會受到改變(如圖 1-10)。

故電能轉換之訊號，可間接量測其相關流場之運動、體積與濃度等性質。目前較為具體者均著重於利用交流電電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率，Kwon et al.[10]利用交流電來量取磁粒子之體積分率可由其相對應之感應磁場強度求得(如圖 1-11)。

磁流體之電能轉換研究方向大多著眼於能源非常珍貴之太空科技應用，方式乃利用熱磁效應將廢熱排放，並利用於排熱過程中磁流體之運動，產生電能再利用。然而轉換效率過低，於一般應用上並無太多迴響，近年來因磁流體之合成技術之進步與微製程之發展，Zahn[11]利用熱磁效應排放廢熱，再旋轉磁流體之粒子，通過一線圈，產生電流，並加以利用。

電能轉換亦可做為一非接觸量測流場之技術，其原理來自於法拉第電磁感應定律，由 Nicklin [12]所做出之法拉第實驗，磁場產生不均勻磁場的原因是利用磁鐵通過線圈時，與線圈產生相對運動，並利用磁鐵以自由落體方法通過線圈中央，以及利用不同匝數之線圈，來比較，速度、匝數及感應電壓之間關係(如圖 1-12 所示)，由 Nicklin 之實驗可以證實，匝數與感應電壓成一線性關係，速度與感應電壓亦為線性關係，此作者另外利用理論法，將速度項單獨推導出，此外可以利用理論法之速度項，來驗證速度與電壓之比例關係。

電能轉換也可以利用在測量速度，Wood 等人[13]亦利用重力加速度關係式，並以計算方法求出磁鐵通過線圈時之速度與位置間關係，並在線圈上加入不同的負載，以討論不同負載對於感應電壓與速度之影響，在此文獻裡面發現，速度與訊號之頻寬成一線性關係，並以能量的方式來表示與時間關係。

也有許多人將氣泡注入到磁液體裡面來研究觀察其感應電壓訊號，Helmholtz excitation coils 輸入交流電來量取氣泡與磁液體中之變化，Yamaguchi et al. [14-16]中指出不同空包率( $\alpha$ )之流場，會影響感應出之電壓，如圖 1-13 所示。而有不同  $\alpha$  值的磁性流體所產生感應磁場，也會對均勻磁場的磁通量密度產生改變，如圖 1-14。當  $\alpha$  值不同時，上層線圈所接受到的磁通密度會比下層所接受到的磁通密度少，原因為磁液體受重力影響，會往管子下層沉，以致於磁液體受交流電磁場影響時，下層磁通量密度會比上層磁通量密度高；另外此作者亦有比較靜止與流動中氣泡的不同時所量測之感應電壓訊號(如圖 1-15)，當交流電頻率較低時，靜止中所感應電壓與  $\alpha$  值呈正比關係，且當靜止與流動空包率相同時，當空包率越小時感應電壓亦會相近。

除了上述所做之空包率與感應電壓關係外，Kuwahara et al.[17-18]有比較當氣泡不同形狀(如圖 1-16)以及大小時會與感應電壓之關係，由圖 1-17 可知，感應電壓會與所感應面積有關，當通過之感應線圈之磁流體面積越勻稱，則波形也越平滑，如果通過的為間斷性，則波形也震盪越多。

Kuwahara et al.除了利用交流電磁場來探討氣泡與感應電壓之間的關係外，另外還提出了量取氣泡速度之機制[19-20]，此作者利用兩組相同機制線圈(圖 1-18)，利用訊號差異性，來取得 $\Delta t$ (圖 1-19)，再利用線圈之距離差來反推速度，並與其他文獻所求得氣泡速度做比較，發現此方法為可行的。

關於磁性流體電能轉換量測之實驗[21]，吳啟鳴學長利用磁性流體感磁特性，改變磁性流體體積讓磁通量密度改變，以及利用感應電動勢(EMF)與速度呈線性關係，來改變速度與體積。在實驗中可以發現，磁通量密度只受體積影響，並不會受到速度干涉，而感應電動勢大小及方向則受磁通量密度及速度影響，當速度越大或磁通量密度越大時，感應電動勢會增大，圖 1-20 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之時間電壓圖。而黃國安學長將磁液滴

實際應用在流場實驗中[22]，來觀察其液滴在實際管流內的型態及使用微小磁液滴是否能抓到產生的感應電壓訊號(如圖 1-21)，並設計出能得到最好訊號之機制，利用不同大小的磁液滴在管內的快速移動來量取不同的電壓值(如圖 1-22)，以及量取不同的磁場密度且對量測到之感應電壓訊號做進一步分析。

依據法拉第定律 (Faraday's law)，磁流體磁通量(magnetic flux) 的變化可以產生感應電動勢 (induced emf)。目前，已有許多學術研究以及工業應用被發表出來，且電磁轉換的觀念未來可以應用至微型裝置 (micro-devices) 設計以及藥物傳遞 (medicine transportation) 的發展上。

### 1-3 研究動機及目的

目前奈米流體在工業及學術界已廣泛的被利用，以熱傳的方面來說，一般奈米流體大都使用熱傳性質較於良好的奈米粒子(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CuO}$  等)，但這些皆為不具有磁導性的奈米級粒子。而磁性流體具有液體的可流動性，又可受外加磁場來控制其運動模式，因此希望由磁性流體別於一般流體的獨特性下，探討磁性流體應用於奈米熱傳的可行性。本研究試圖使用具有磁導性的水基磁性流體與純水混和作為奈米流體，探討磁性流體之基本性質以及如何提高流體熱傳性質，並且將所量取的數據作無因次化，建立磁性流體紐森數(Nusselt number) 與雷諾數(Reynolds number)的關係圖，再與參考文獻做比較。除此之外，利用法拉第電磁感應原理，當磁性流體通過外加磁場，因磁場通於交流電而產生時變之磁場，使得磁性流體隨時間受到大小不同的磁場而磁化，進而產生感應電壓訊號，且當磁性流體的溫度與體積分率改變時其產生的感應電壓的振幅大小也會有所不同，進而探討不同狀態下的磁性流體對感應電壓大小之關係。

在未來的應用上，如果能以磁性流體產生的感應訊號，進行分析而得知磁性流體的性質如溫度、體積分率，往後可用於流場中溫度之非侵入式量測，以

及在生醫應用及微混合器涉及磁粒子於環境流體之運動輸送，磁粒子在輸送過程中無法精準了解其運送情況，磁性流體或磁粒子之濃度變化為一非常重要須要掌控與瞭解之項目。若能更加充分了解磁性流體在磁場下的物理現象，則其可應用範圍便可擴大延伸。



表 1-1 磁性流體的製造方法

粉碎法	把水銀為陰極裝入 $\text{FeSO}_4$ 水溶液，通電流而溶解，於是 Fe 離子析出，此時攪拌水銀析出超微粒子，分散於水銀中，預先使錫溶於水中，阻止鐵超微粒子成長，生成安定的水銀溶媒鐵膠體粒子磁性流體。
火花侵蝕法	把金屬電極插入液體中，在液體放電，使電極金屬以膠體粒子形溶入液體中，亦即火花放電使電極金屬蒸發，在液體中急冷，成為超微粒子。
共沉法	用第一鐵鹽與第二鐵鹽在水中反應時，會產生磁鐵礦微粒子，即可生成磁性流體。
熱分解法	把化學上不安定的有機金屬熱分解，析出金屬單體，此時析出的金屬成為超微粒子析出溶媒中，作為磁性流體。
真空蒸發法	在抽真空的鐘罩中，把金屬加熱蒸發，在真空中急冷，作成金屬的超微粒子，形成磁性流體。
紫外線分解法	以高能量光(紫外線)取代熱分解，分解有機金屬，作為金屬的超微粒子，形成磁性流體。
電著法	把水銀為陰極裝入 $\text{FeSO}_4$ 水溶液，通電流而溶解，於是 Fe 離子析出，此時攪拌水銀析出超微粒子，分散於水銀中，預先使錫溶於水中，阻止鐵超微粒子成長，生成安定的水銀溶媒鐵膠體粒子磁性流體。



# Technology Overview

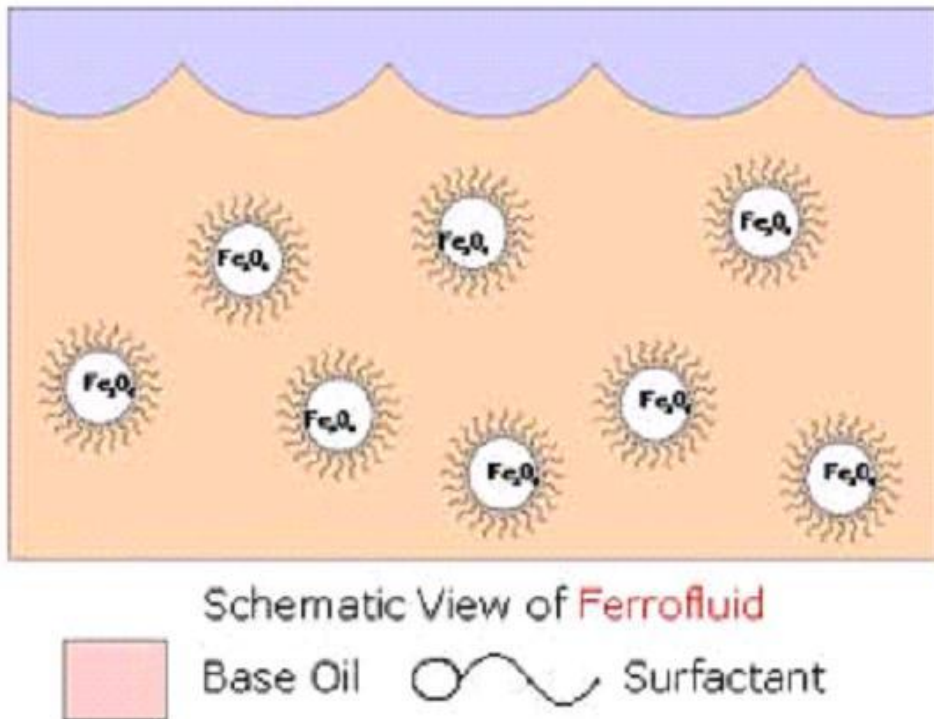


圖 1-1 磁性流體構成圖

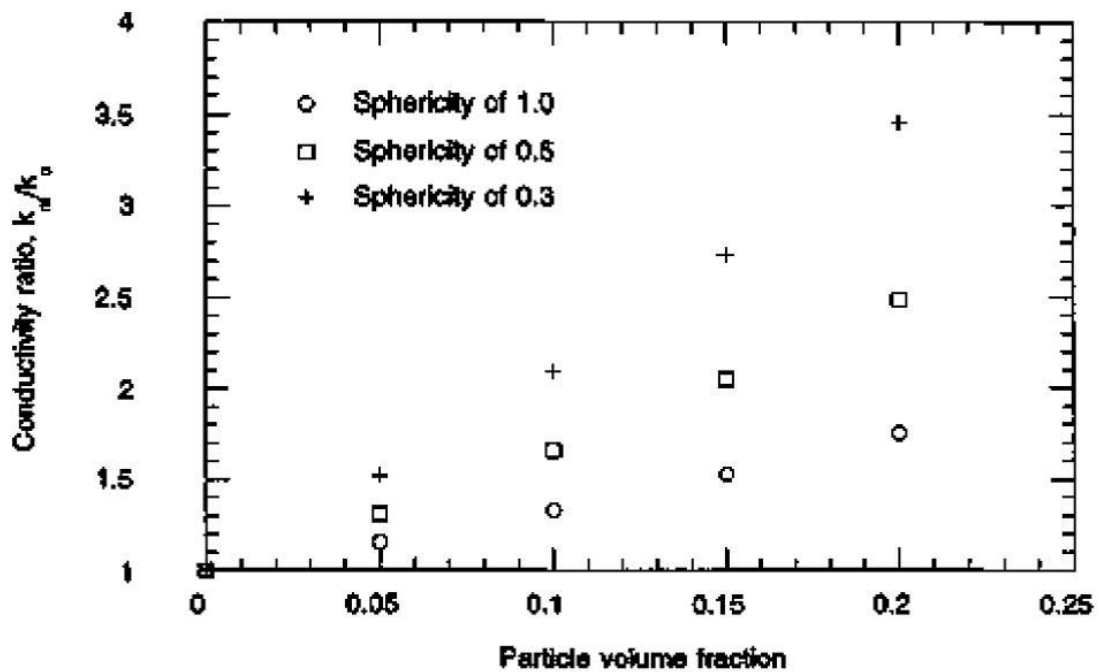


圖 1-2 不同形狀因子對於熱傳導係數比的影響[3]

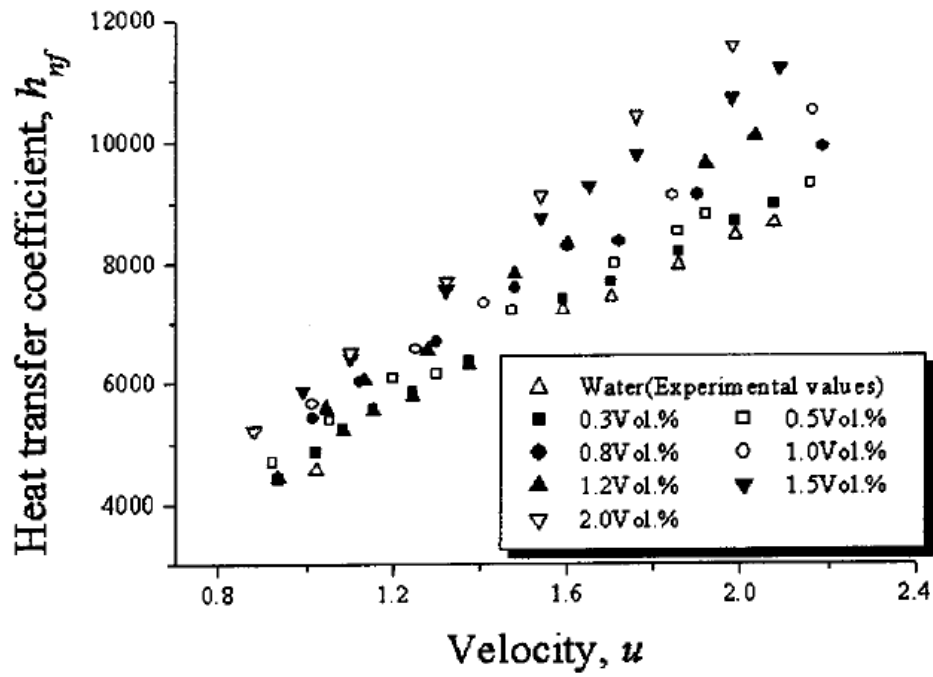


圖 1-3 奈米流體之熱傳係數隨著粒子的體積分率增加而增強[5]

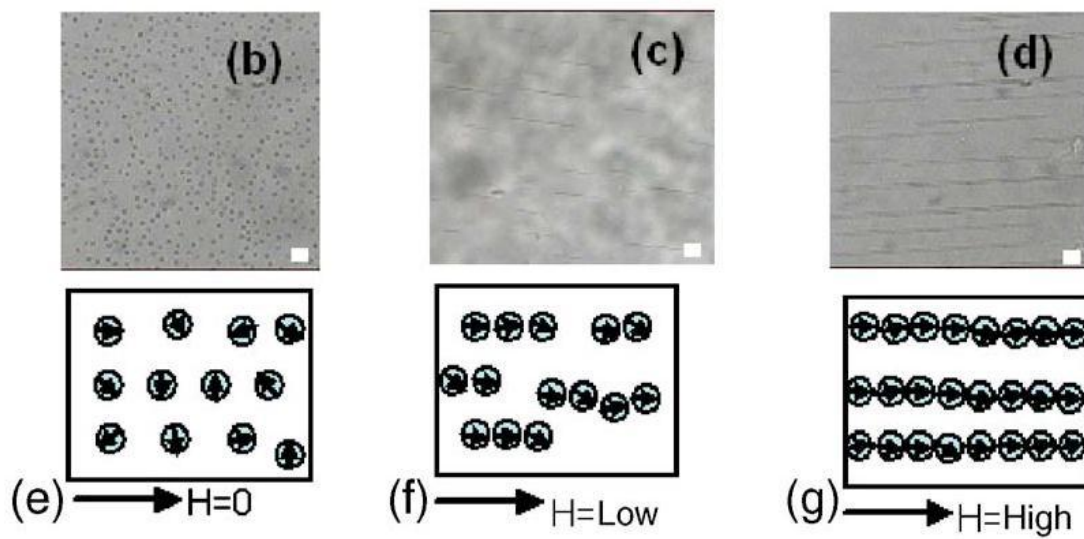


圖 1-4  $Fe_3O_4$  粒子在不同磁場下之鏈狀排列[7]

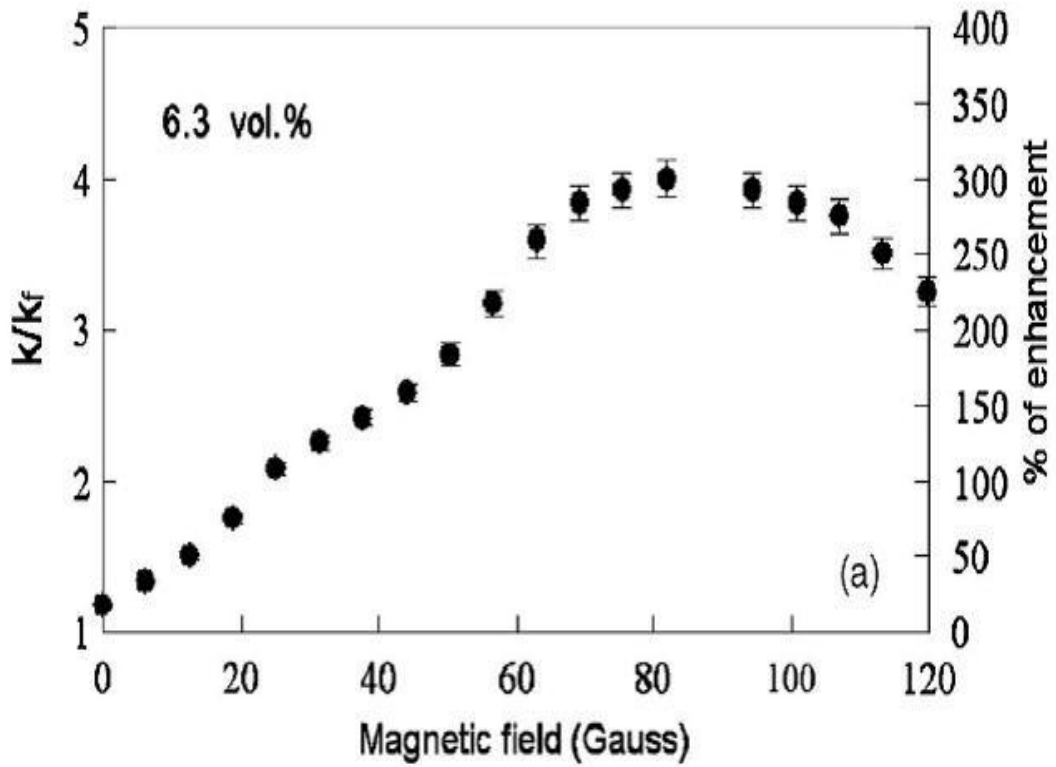


圖 1-5 不同磁場下的鐵奈米流體之熱傳導係數比[7]

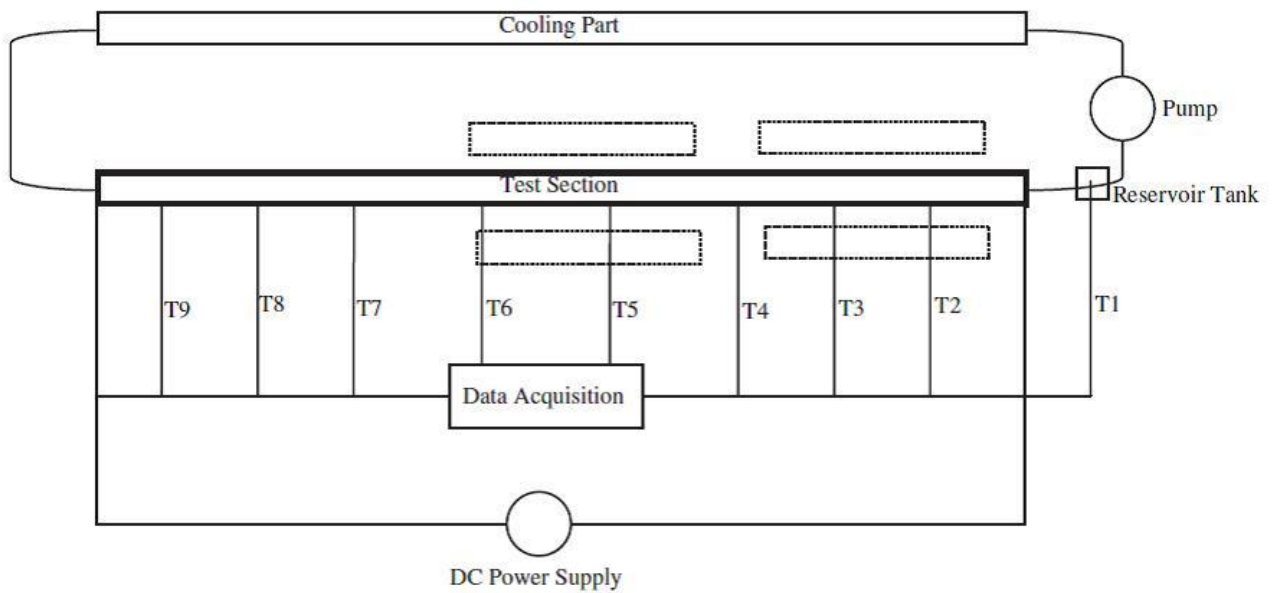


圖 1-6 利用外加磁場增強磁性流體的熱對流效應之裝置圖[8]

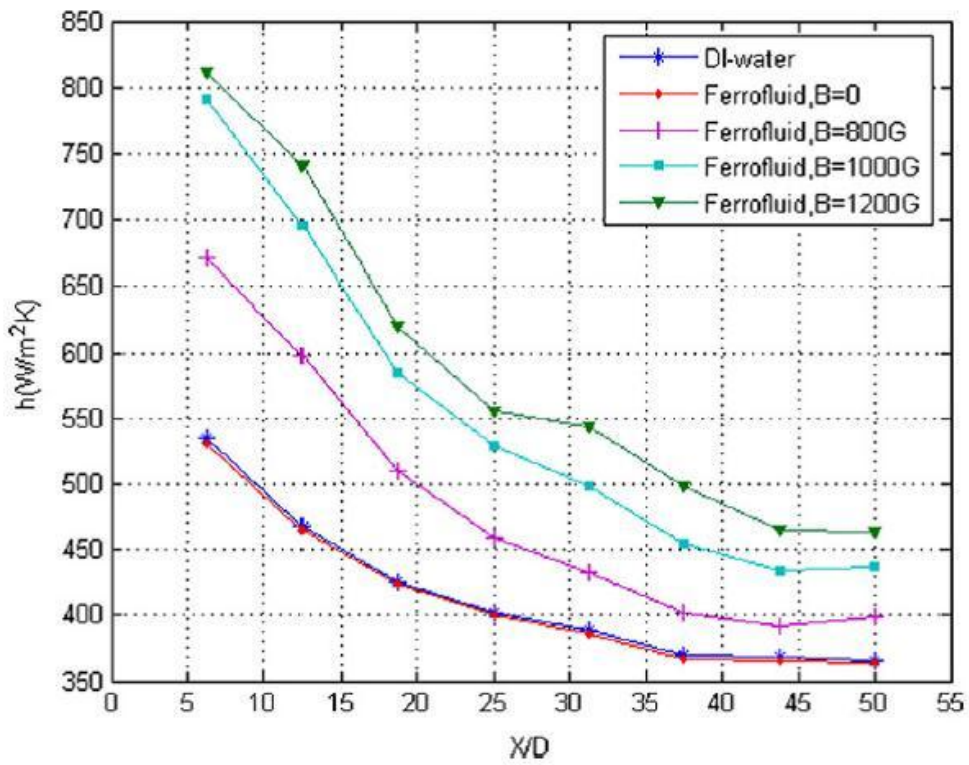


圖 1-7 增強外加磁場使磁性流體的熱對流效應增加[8]

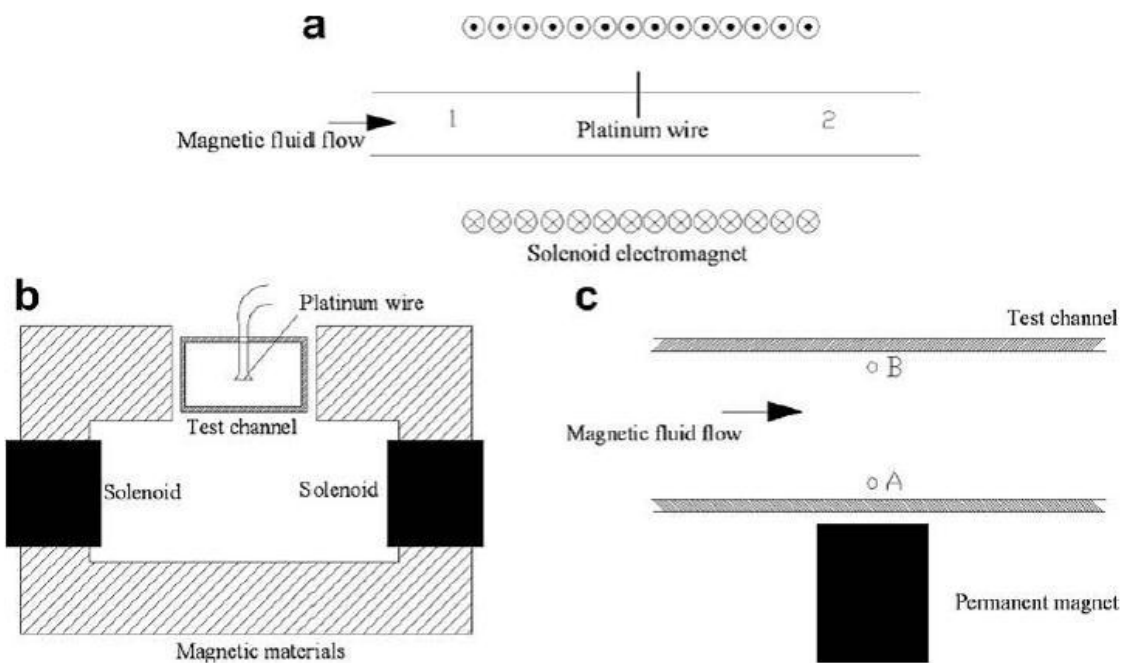


圖 1-8 外加磁場不同的擺放方式[9]

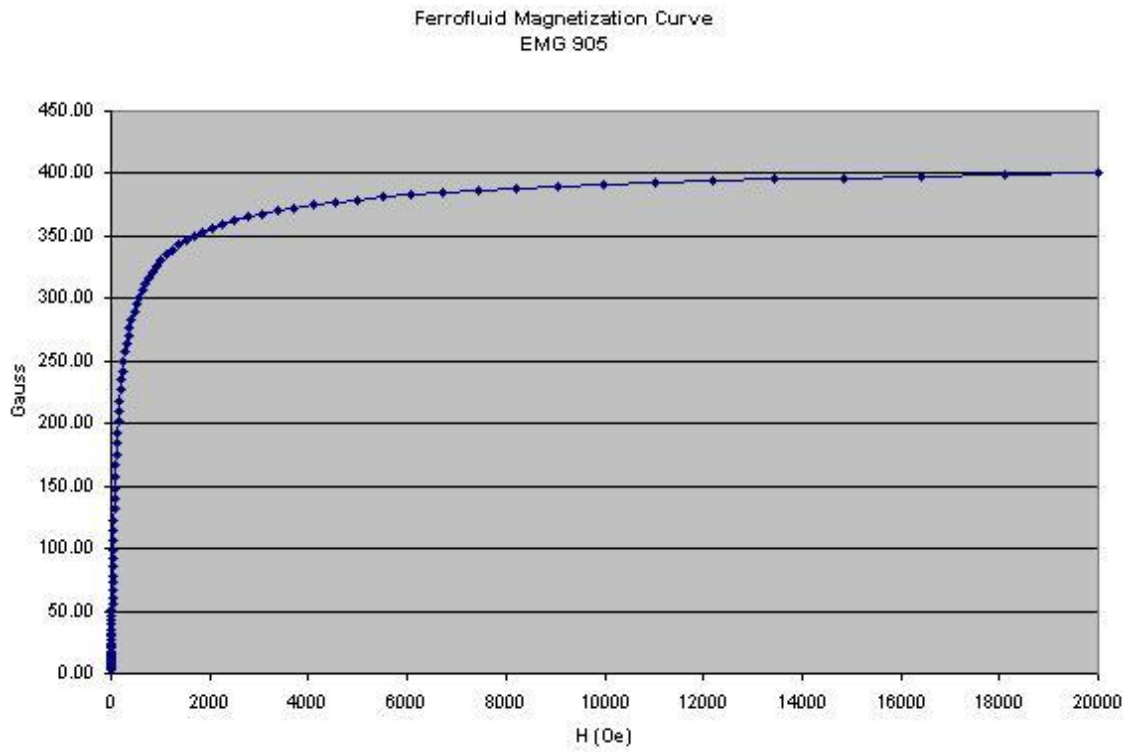


圖 1-9 磁流體受磁場之感磁情形

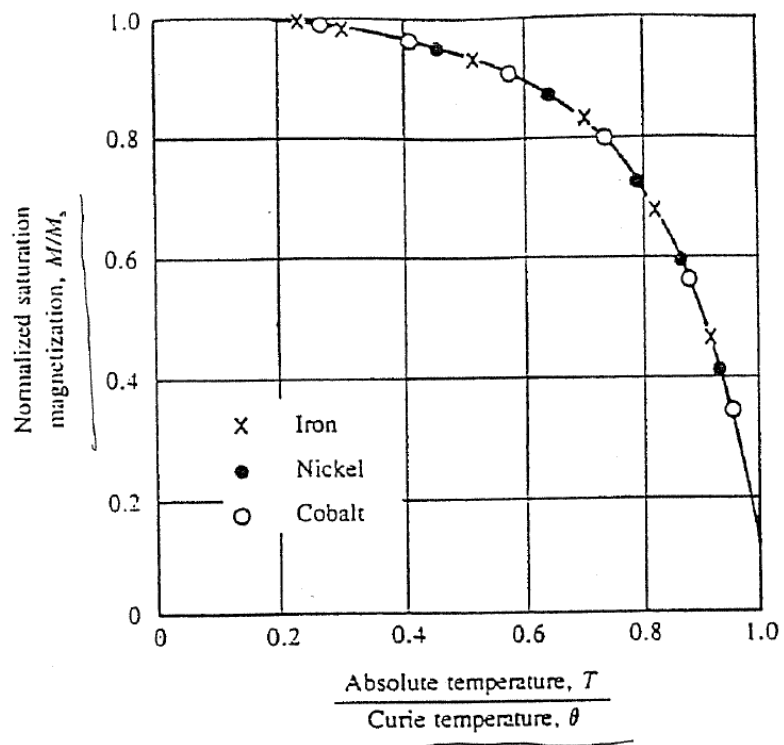


圖 1-10 磁性流體的磁化強度與溫度之曲線圖

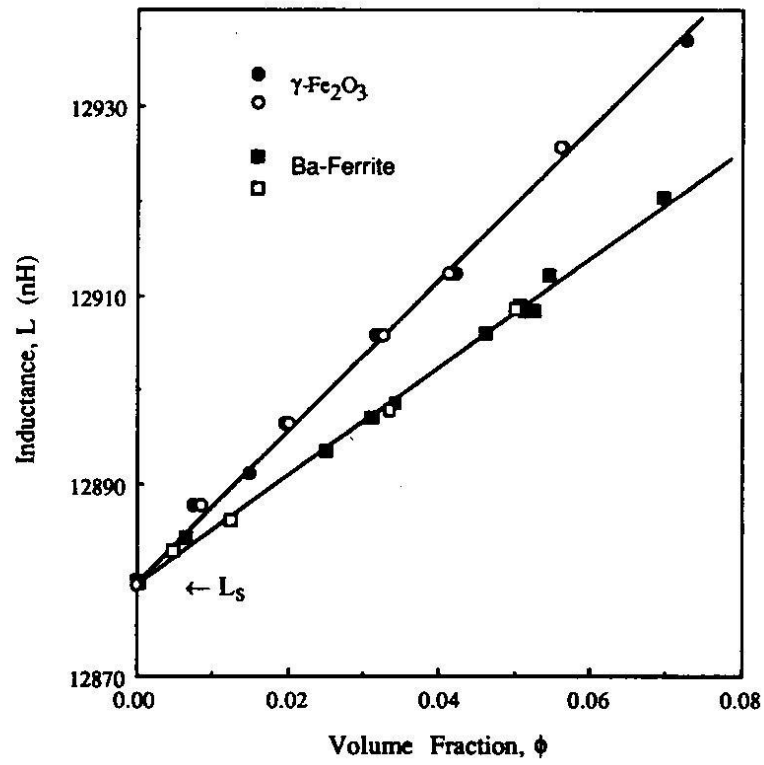


圖 1-11 利用交流電電磁線圈量測於一靜態溶液中磁粒子之體積分率[10]

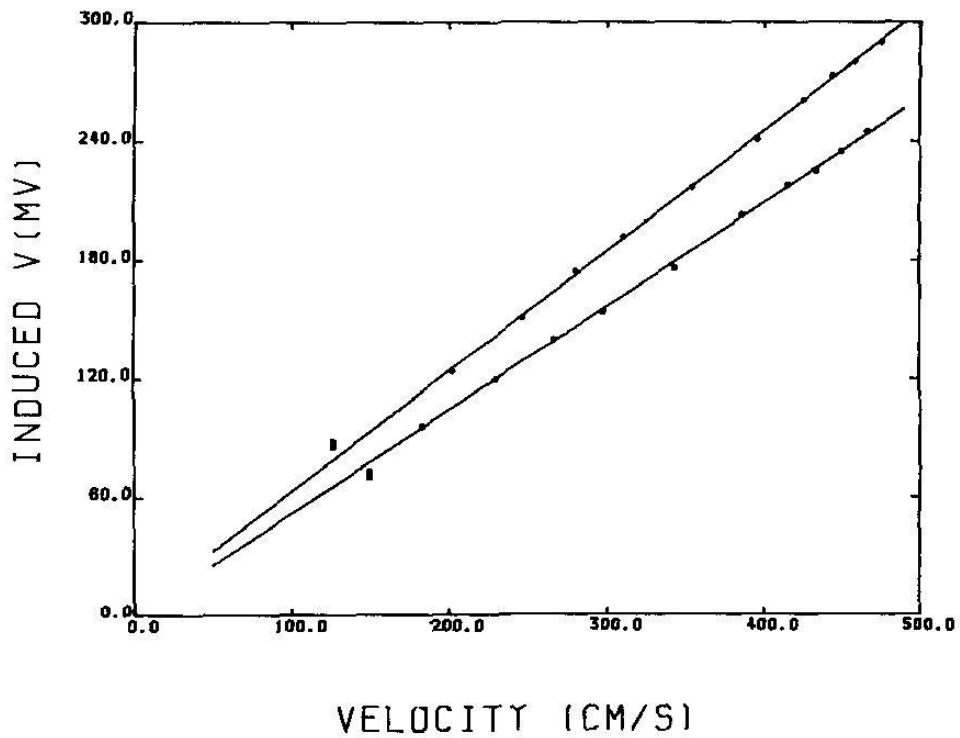


圖 1-12 Nicklin 等人發現感應電壓及速度之感應電壓關係[12]

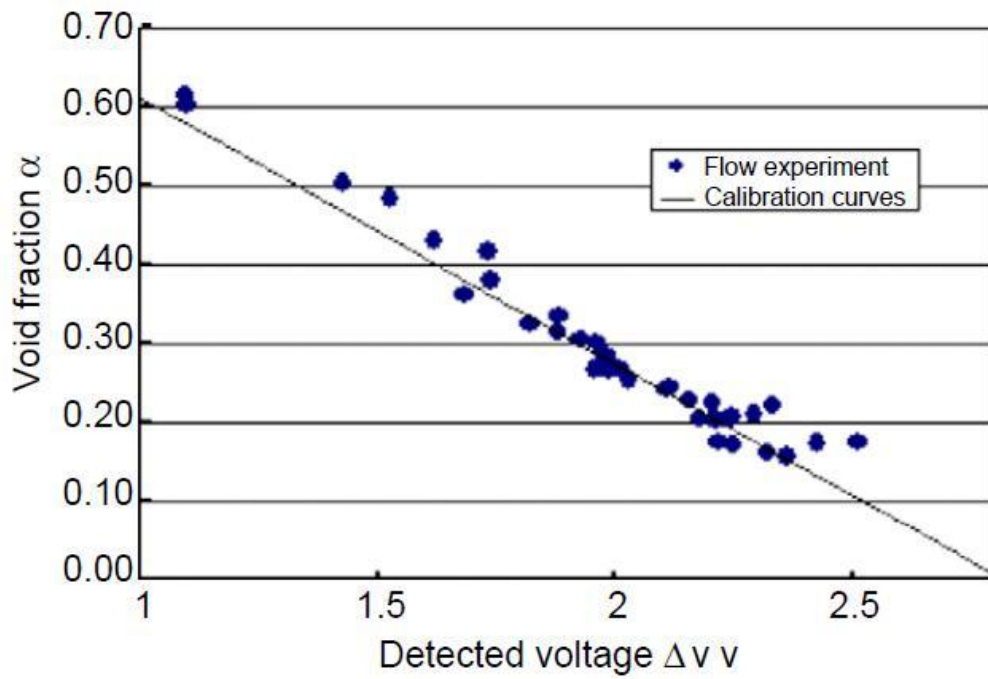


圖 1-13 磁性流體之不同空包率與感應電壓差的關係[16]

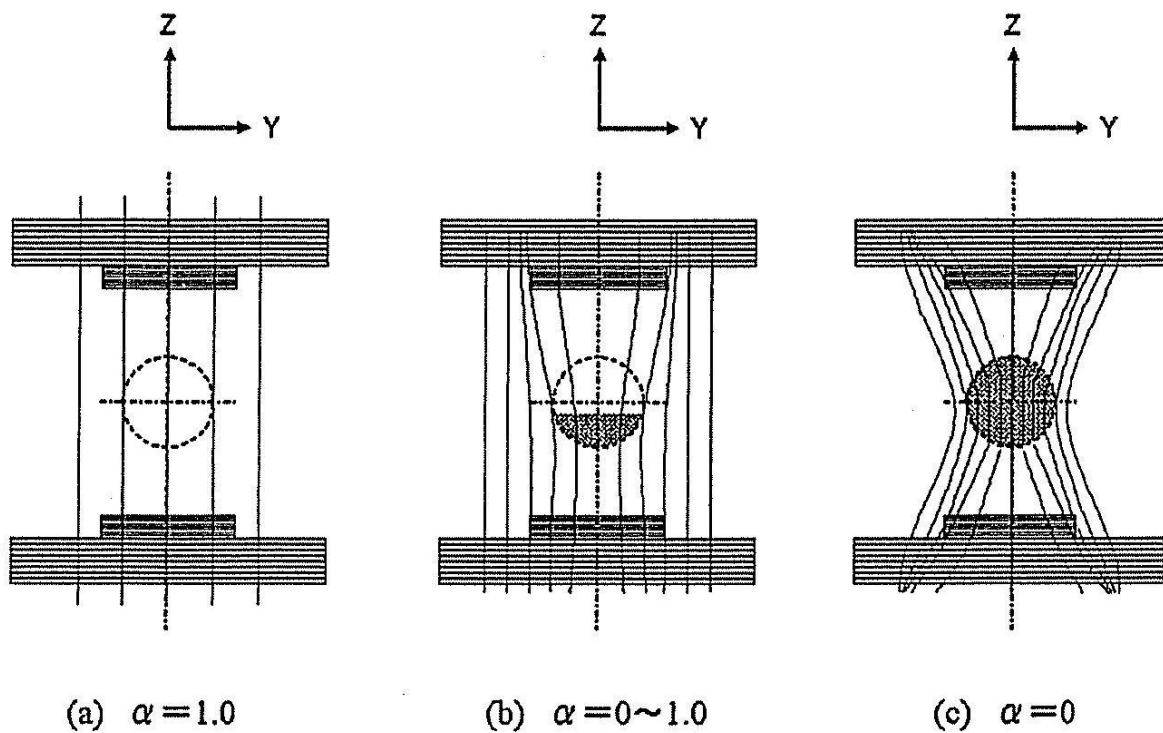


圖 1-14 不同空包率所產生之磁場[14]

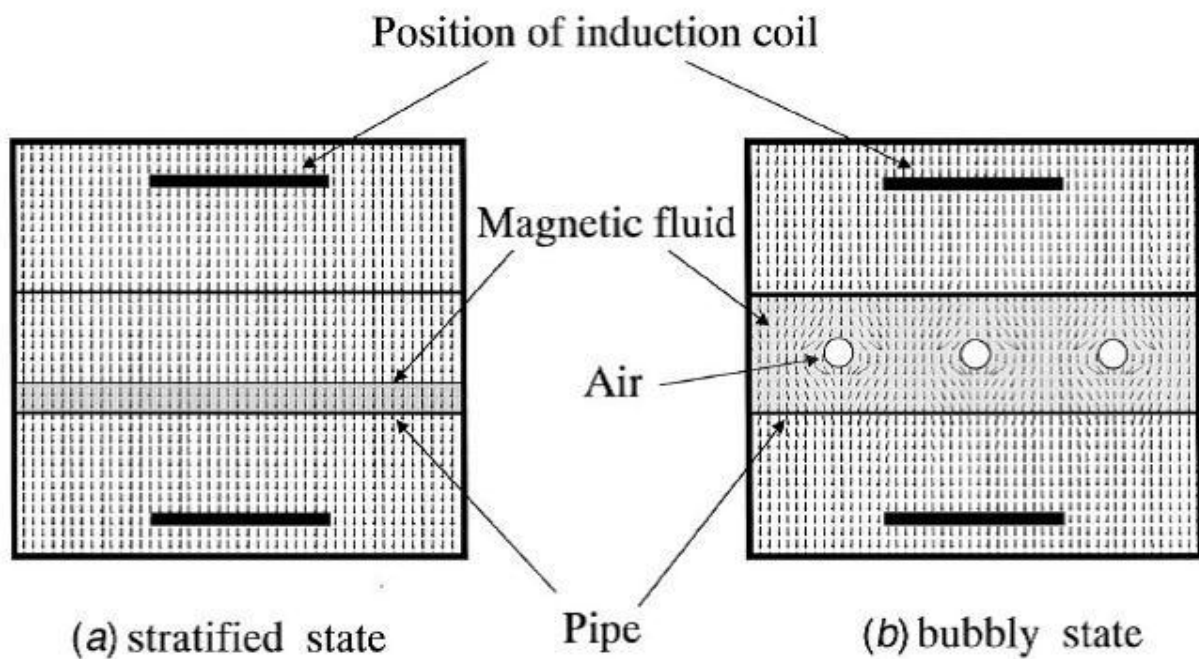


圖 1-15 Yamaguchi et al 比較靜止與流動兩相不同之感應電壓變化[15]

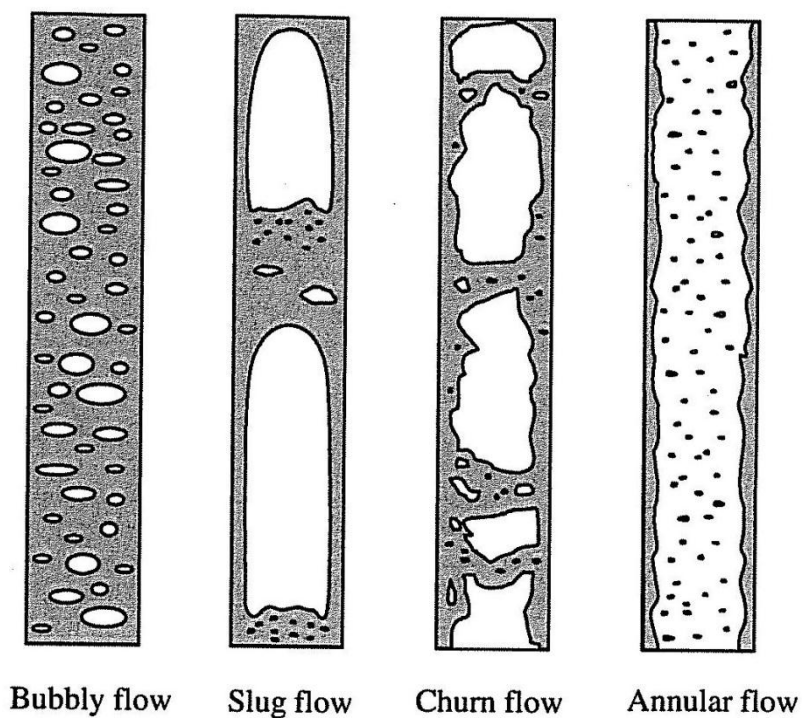


圖 1-16 氣泡於垂直管中分布情況[18]



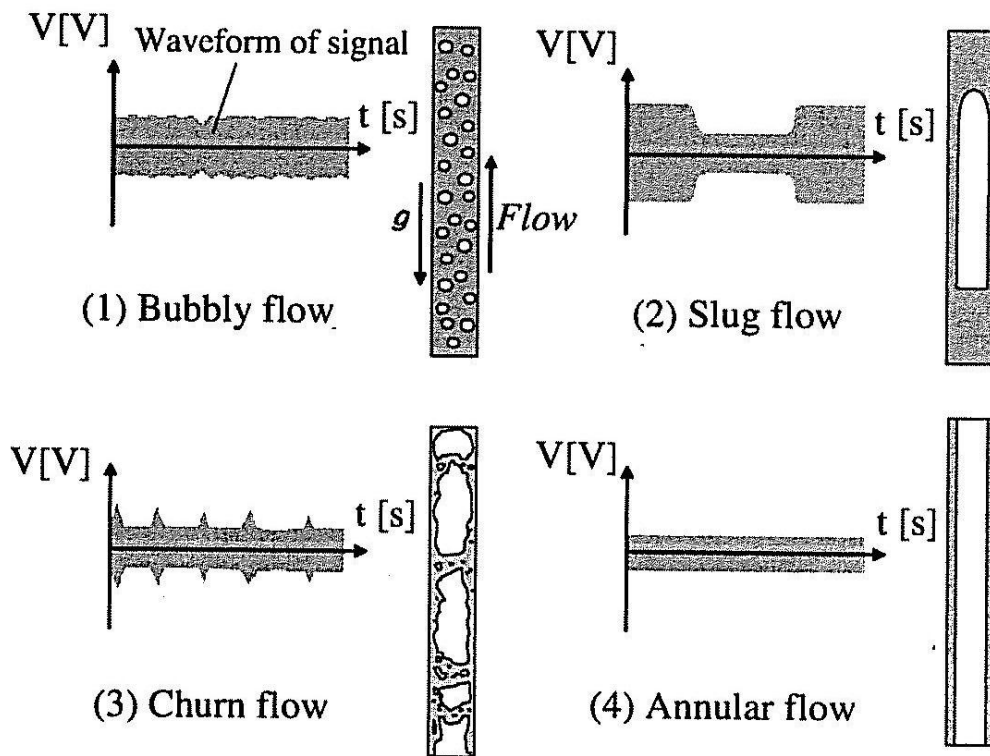


圖 1-17 不同流動情況所產生之感應電壓[18]

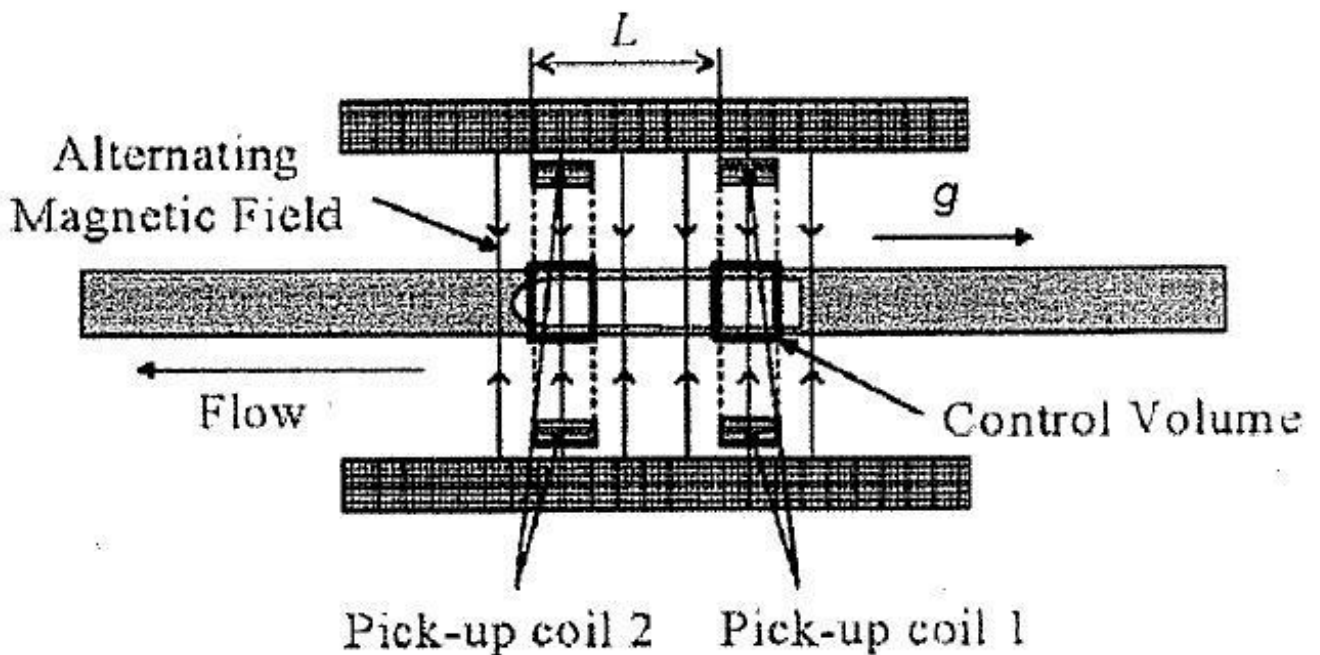
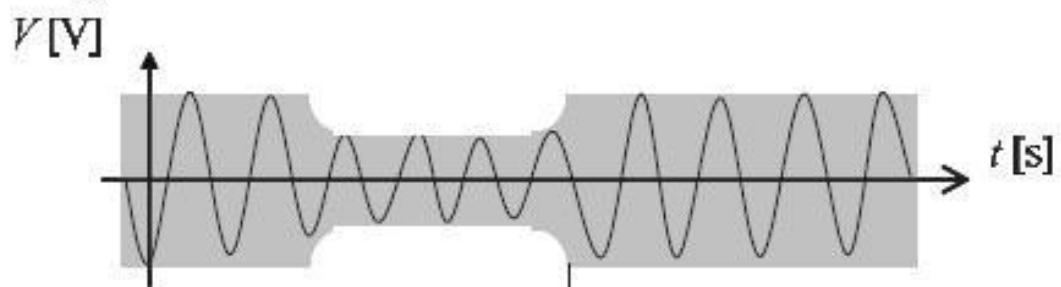
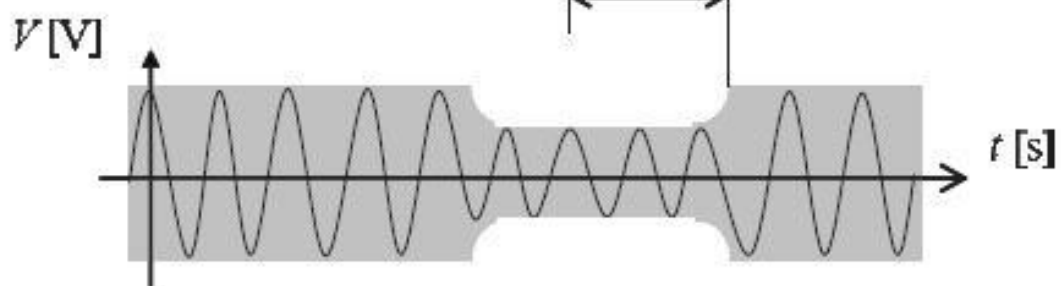


圖 1-18 利用兩組相同感應線圈(pick-up coils)來取得訊號[20]

Wave signal in induction coil 1



Wave signal in induction coil 2



## (2) Signals in induction coils

圖 1-19 兩組相同線圈之感應電壓所產生時間差[20]



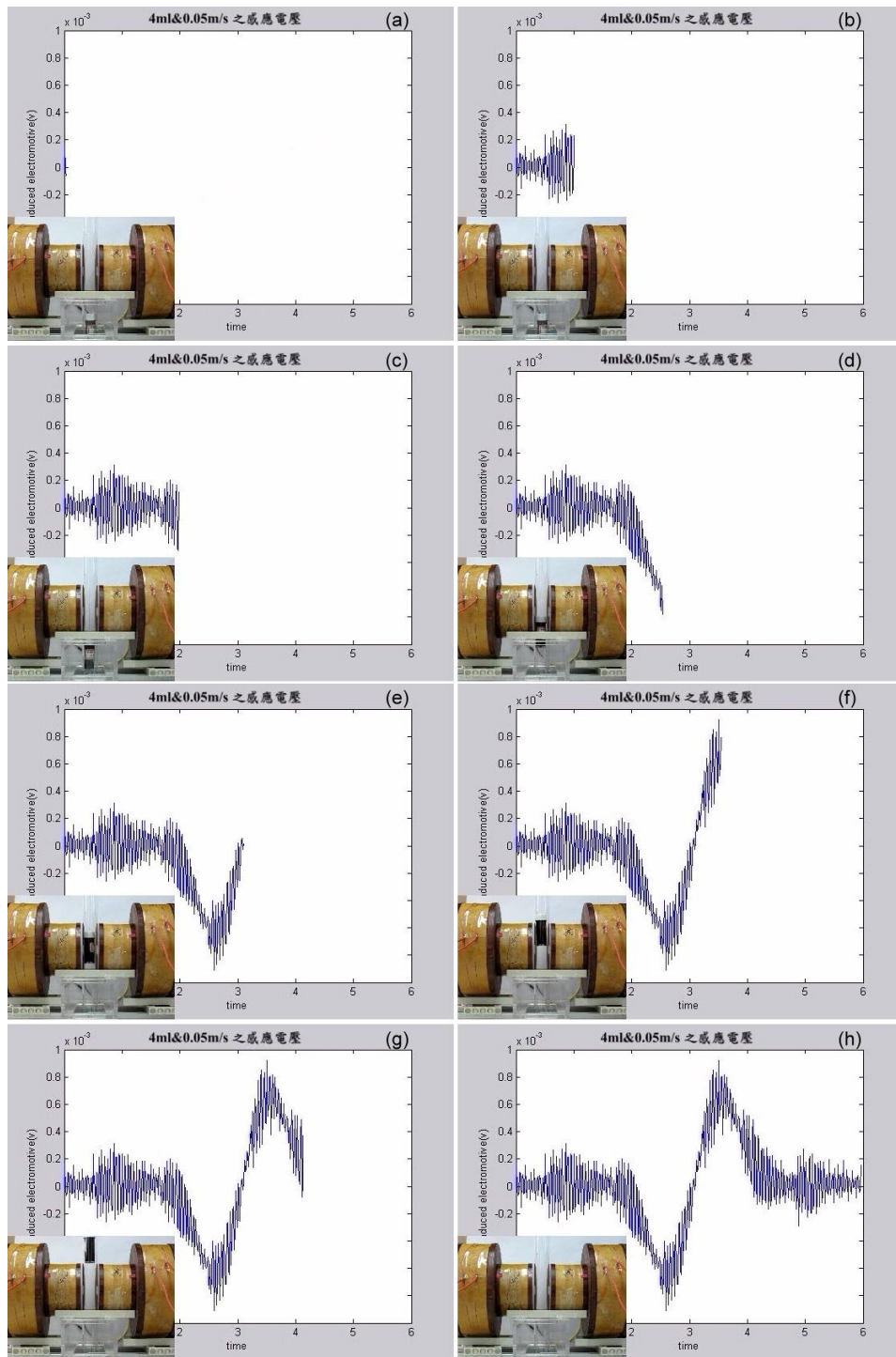


圖 1-20 為磁性流體(4 ml)受外力以移動(0.05 m/s)產生感應電壓(V)之時間電壓  
圖[21]

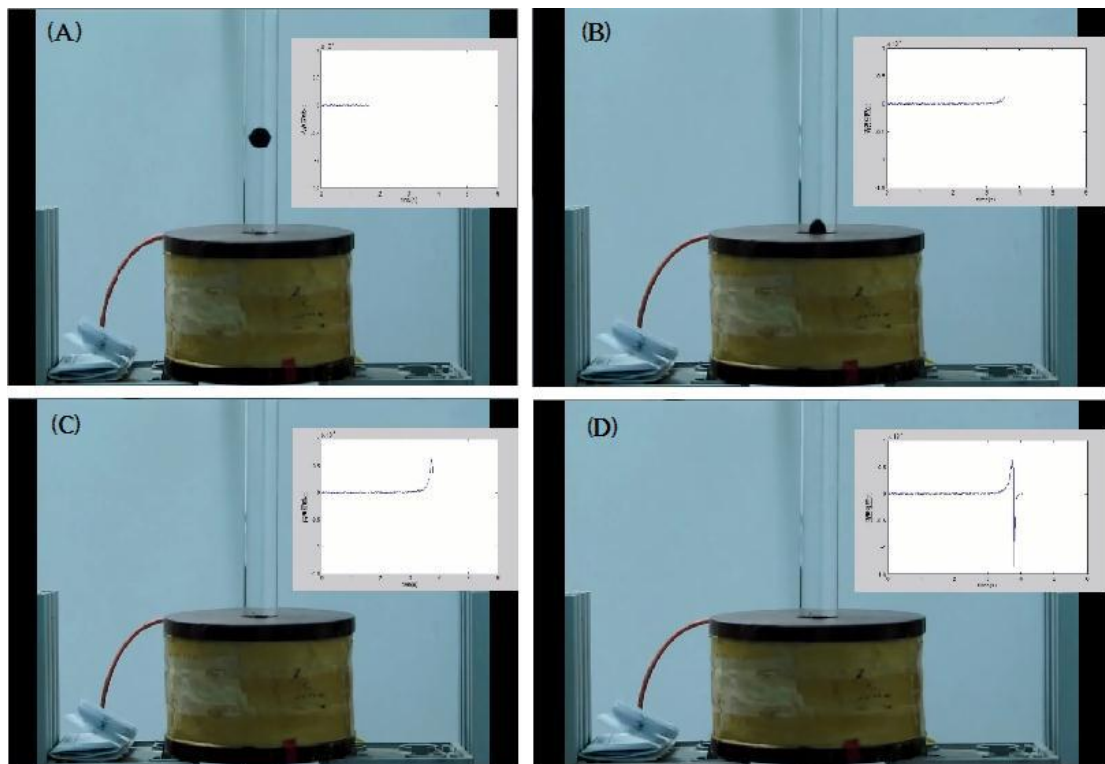


圖 1-21 當磁液滴(0.16cc)通過一顆感應線圈時，所量測到的感應電動勢[22]

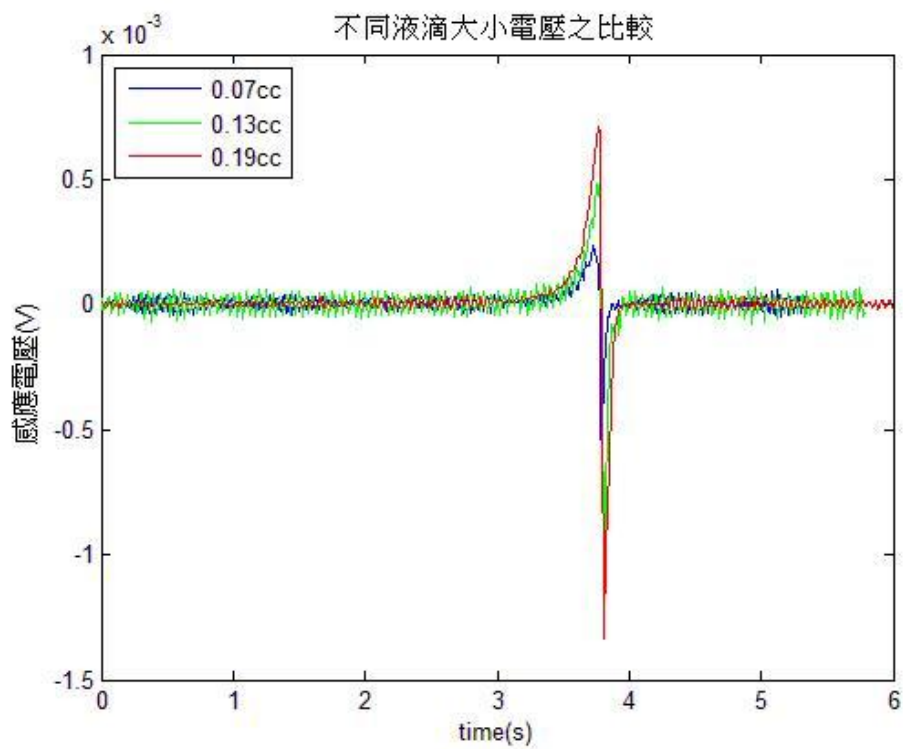


圖 1-22 下方為永久磁鐵及橫放感應線圈時，分別用 0.07cc、0.13cc 及 0.19cc 之磁液滴來量取的感應電壓[22]

## 第二章 實驗原理、設備及方法

本實驗探討磁性流體的在層流下之圓管流的熱傳係數(heat transfer coefficient)和紐森數(Nusselt number)，以及當磁性流體通過線圈所產生的感應訊號，並將其數據紀錄並加以分析。

### 2-1 實驗儀器及說明

本實驗之實驗設備包括磁性流體、蒸餾水、白蠟油、冷卻循環水槽、隔膜式幫浦、軟式電熱片、鋁圓管、K-type 熱電耦(一般型及液用型)、資料擷取器、交流電電源供應器、激磁線圈、感應線圈、玻璃管、矽膠管、電腦。將本研究之實驗設備簡單繪製成實驗示意圖，如圖 2-1 所示，先將流體放置於冷卻循環水槽中達到預設冷卻溫度，流體再藉由隔膜式幫浦產生強制對流作為驅動，當流體通過加熱片(熱端)時使之加熱，搭配多組熱電耦測量不同位置之熱端管壁溫度，其熱電耦連結資料擷取器，所量測之溫度訊號再傳至電腦做紀錄;另外，當流體通過激磁線圈時會使磁性流體產生磁化，再利用感應線圈產生的感應訊號傳至資料擷取器並記錄於電腦裡;最後流體流回冷卻循環水槽將流體降溫至預設溫度，實驗裝置之實體圖如圖 2-2 所示。

本實驗中所使用的磁性流體為型號 APG830 油基磁性流體以及 MGF 水基磁性流體。作為奈米熱傳方面的磁性流體使用的是 MGF 水基磁性流體，而作為訊號擷取的磁性流體為 APG830 油基磁性流體。為了調配出不同濃度的磁性流體，本文將磁性流體之濃度以體積分率( $\Phi$ )來表示，而體積分率( $\Phi$ )定義如下:

$$\text{磁性流體之體積分率}(\Phi)=\frac{\text{磁性流體體積}}{(\text{磁性流體體積與工作流體體積之和})}$$

在本文中磁性流體之體積分率( $\Phi$ )定義與文獻中不全然相同，文獻中的體積分率定義為：奈米粒子體積/奈米粒子體積與基底流體體積之和。APG830 油基磁性流體的黏滯度  $\mu=96.8$  cp、密度  $\rho =1.036$  gm/ml、飽和磁化  $M_s=2170e$ ，MGF 水基磁性流體的黏滯度  $\mu=35.4$  cp、密度  $\rho =1.28$  gm/ml、飽和磁化  $M_s=220e$ 。

本實驗加熱之裝置採用軟式矽膠電熱片，其輸入電壓為 220V 交流電，最大功率為 150W，將軟式加電熱片均勻包覆鋁圓管，再以玻璃纖維棉包覆軟式電熱片作為與外界環境之絕熱層，以確保加熱片能完全地將熱量傳至磁性流體，其中鋁圓管的長度  $L=580$ mm，內徑  $D=10$ mm、厚度為 3.0mm；將測量管壁溫度的熱電耦埋設於管壁上，不同編號之熱電耦與其埋設之位置如圖 2-3 所示。冷卻循環水槽(如圖 2-4)之冷卻功率為 1/3HP，溫度控制範圍為  $-20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。本實驗使用隔膜式幫浦(如圖 2-5)作為流體之驅動裝置，其型號為 Liquiport 300，流量控制範圍為 0.5~3.0 L/min。

感應電壓訊號量測之裝置為一激磁線圈和一感應線圈，其中激磁線圈的內徑為 55mm、長度為 150mm、匝數為 6400 匝，感應線圈的內徑為 19mm、長度為 40mm、匝數為 300 匝，磁場由交流電電源供應器（如圖 2-6）將電流輸入至激磁線圈產生。

## 2-2 實驗步驟

### 2-2-1 奈米流體熱傳

實驗開始之前置作業為，混合水基磁性流體及蒸餾水調配至所需之體積分率的磁性流體，放置於冷卻循環水槽中並待數十分鐘至磁性流體到達預設之溫度，方可進行實驗。

進行實驗時，調整幫浦預設之流量並且開啟幫浦使幫浦驅動磁性流體注入圓管內，為確保實驗之準確度，需將管內之氣泡移除，接著連接熱電耦並且開啟資料擷取器及 Fluke DAQ 4.0，將各熱電耦量測到的溫度記錄於電腦裡，接著開啟電熱片之電源之後靜待至各位置溫度達到穩態，一次實驗即可結束。當單一實驗結束後，關閉電熱片之電源並等待各點溫度冷卻至初始狀態，即可調整下一實驗所需之流量並且重複上述步驟。

當實驗全部結束後，將所紀錄之溫度以 Excel 形式匯出，並且以 Matlab 進行計算與繪圖，以利作為分析。

## 2-2-2 電磁轉換

實驗開始之前置作業為，混合 APG830 油基磁性流體及白油調配至所需之體積分率的磁性流體，放置於冷卻循環水槽中並待數十分鐘至磁性流體到達預設之溫度；接著連接感應線圈至資料擷取器並且開啟資料擷取器及 Fluke DAQ 4.0，測試感應線圈有確實的連結到資料擷取器後，方可進行實驗。

進行實驗時，控制冷卻水槽之溫度並開啟幫浦驅動磁性流體，待磁性流體完全充滿實驗的玻璃管，並且需將管內的氣泡移除，以確保實驗之精準度；此時將交流電電源供應器調整電壓至 40V、頻率為 1Hz 開啟交流電電源供應器，並紀錄感應電壓之訊號約為 60 秒，關閉電源供應器之電源，完成一次實驗。

接著改變冷卻循環水槽的溫度，靜待數十分鐘以待流體達到設定溫度，重複上述實驗。若要改變磁性流體的體積分率，需重新調配磁性流體並重新由實驗前置作業開始做起。

當實驗全部結束後，將所紀錄之感應電壓訊號以 Excel 形式匯出，並且以

Matlab 進行計算與繪圖，以利作為分析。

## 2-3 理論背景

### 2-3-1 奈米流體熱傳

在 Dongsheng Wen 等學者[23]的文獻中，可得知流動中磁性流體的熱傳表現可以用對流熱傳係數  $h$ (convective heat transfer coefficient )以及紐森數  $Nu$  (Nusselt number )來定義，公式如下：

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_f(x)} \quad (1)$$

$$Nu(x) = \frac{h(x) \cdot D}{k} \quad (2)$$

其中  $h$ 、 $Nu$ 、 $T_w$ 、 $T_f$  均為位置  $x$  的函數， $x$  代表離加熱入口端的距離， $q''$  為熱通量， $T_w$  和  $T_f$  分別為管壁溫度及流體溫度，管壁溫度  $T_w$  可由熱電耦測量之， $D$  為圓管之內徑， $k$  為流體的熱傳導係數，而流體溫度  $T_f$  分布可由熱力學第一定律能量守恆的觀念推導得知，公式如下所示：

$$T_f(x) = T_{in} + \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot U \cdot A} \cdot \frac{x}{L} \quad (3)$$

其中  $Q$  為熱功率， $C_p$  為流體的等壓比熱， $\rho$  為流體的密度， $U$  為流體之平均流速， $A$  為圓管的截面積， $L$  為加熱端的全長；上式公式的假設建立在無熱損失，因此熱功率  $Q$  可以藉由量測  $T_{in}$  與  $T_{out}$  的溫度差值進行與理論計算的比對。

欲比較  $Nu$  與雷諾數  $Re$ (Reynolds number)的關係，計算  $Re$  公式如下，其中



$\mu$  為流體的黏滯係數(viscosity coefficient)。

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (4)$$

而根據 Maryamalsadat Lajvardi 學者[21]等人的文獻中提到，將所計算的結果將與 Shah equation 做比較，此 Shah equation 為在層流中且邊界條件為固定熱通量，其中 Shah equation 方程式如下：

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left( Re Pr \frac{D}{x} \right)^{1/3} & \left( Re Pr \frac{D}{x} \right) \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x} & \left( Re Pr \frac{D}{x} \right) < 33.3 \end{cases} \quad (5)$$

### 2-3-2 電磁轉換

法拉第電磁感應定律為電磁學中之基本定律，公式如下：

$$V = -N \left( \frac{d\Phi_m}{dt} \right) \quad (6)$$

其中  $V$  為感應電壓； $N$  為感應線圈匝數； $\Phi_m$  為磁通量； $t$  為時間，磁通量改變情況如下(磁場間本身會隨時間改變、磁場本身有相對運動、以及磁場間有一介質，其介質會隨磁場而改變磁化強度…等)。公式中“ $-$ ”代表方向性，電動勢的方向(公式中的負號)由冷次定律提供。

其中，法拉第電磁感應定律中之磁通量可以寫成下式：

$$\Phi_m = \int B \cdot dA_i \quad (7)$$

其中， $B$ 、 $A_i$  分別代表磁通量密度及與磁場垂直之感應面積大小。由以上公

式可看出，磁通量是由通過面積與垂直之磁場通量所得，並且可由磁場密度及面積所求得。將(2)式轉換圓柱座標，以利計算，如下式表示：

$$\Phi_m = \int_0^R Bz(2\pi r)dr \quad (8)$$

其中為  $r$  受磁場感應面積，此公式可以說明當感測物形狀為圓柱形時，將可利用此方式計算。

磁通量密度是由線圈磁通量密度及磁液體之磁化強度所得，以下式表示：

$$B = \mu_0(H + M) \quad (9)$$

上述式子表示當磁液體通過磁場時，線圈磁通量密度為一定值( $H=\text{constant}$ )，但磁液體之磁化強度會隨磁性流體的體積分率變化而有改變。若是磁性流體流經一均勻磁場，則磁通量密度可以修正為：

$$B = \mu_0(H + \Phi M) \quad (10)$$

$B$  為磁性流體的磁通量密度， $M$  為磁性流體的磁化強度， $\Phi$ 則為磁性流體的體積分率。將(7)、(9)兩式帶入(5)式，得(10)式，其中(10)式可以表示，法拉第定律可改變之變數包含，線圈匝數、磁性流體的體積分率、磁場變化與線圈大小皆會改變感應電動式大小。

$$V = -N \frac{d}{dt} \int_0^R [\mu_0(H + \Phi M)](2\pi r) \cdot dr \quad (11)$$

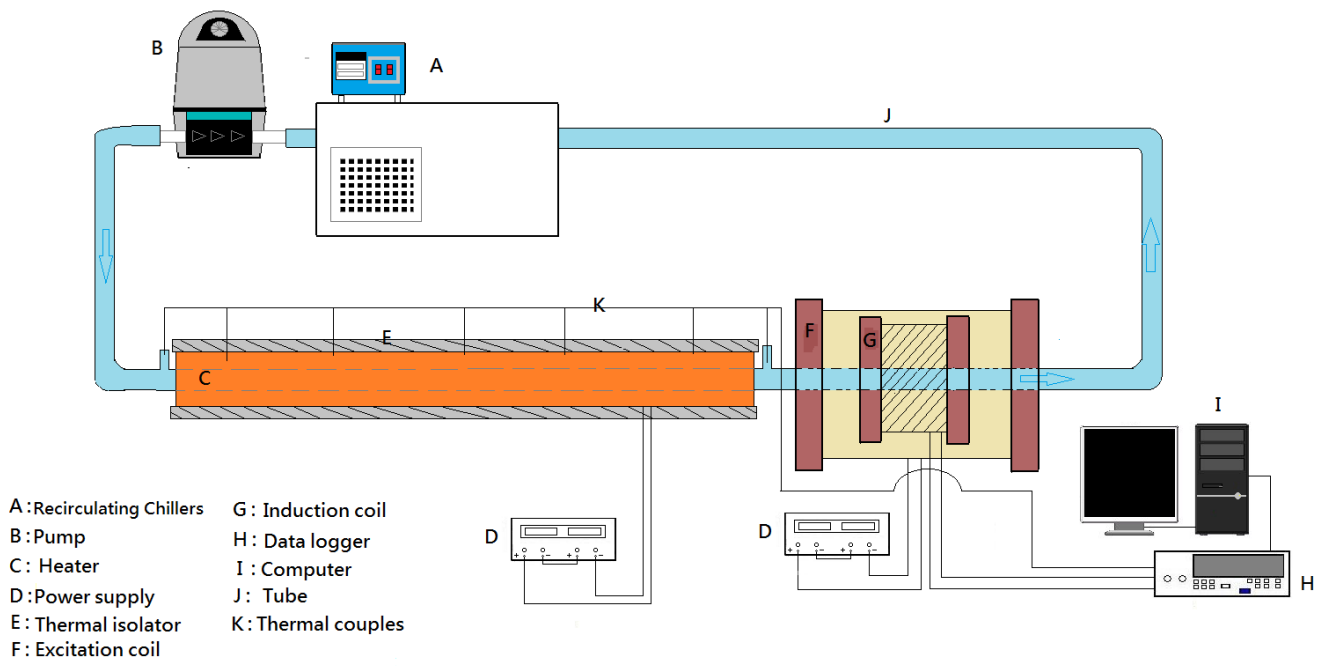


圖 2-1 量測奈米熱傳與訊號轉換之裝置示意圖

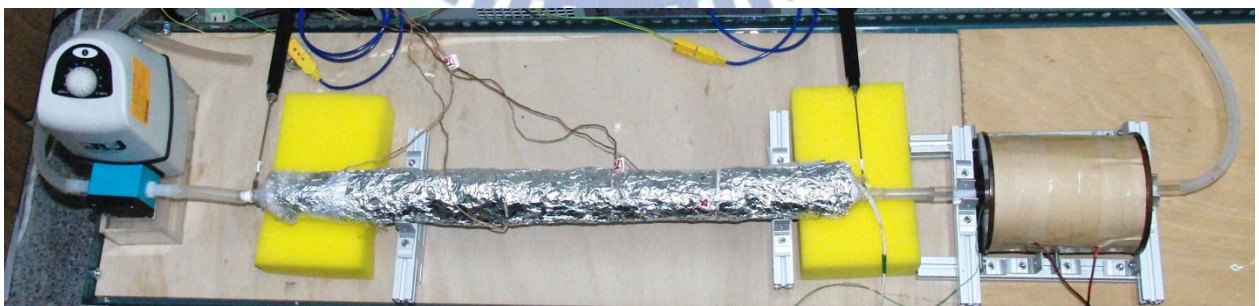


圖 2-2 量測奈米熱傳與訊號轉換之裝置圖

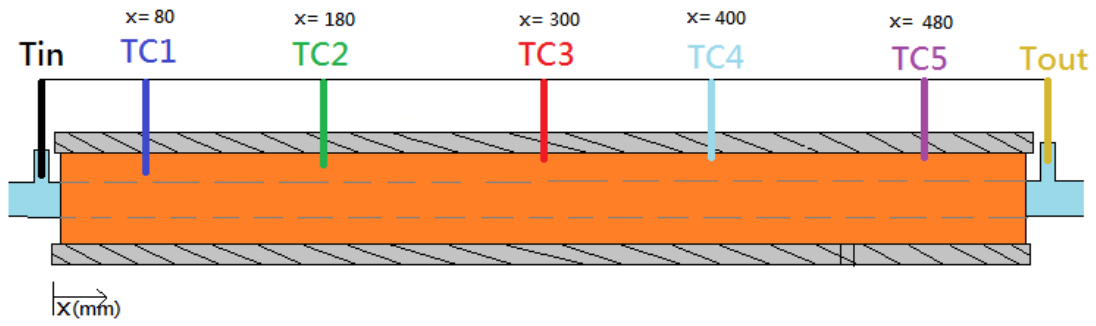


圖 2-3 熱電耦埋設在鋁管壁上的位置圖



圖 2-4 冷卻循環水槽



圖 2-5 隔膜式幫浦

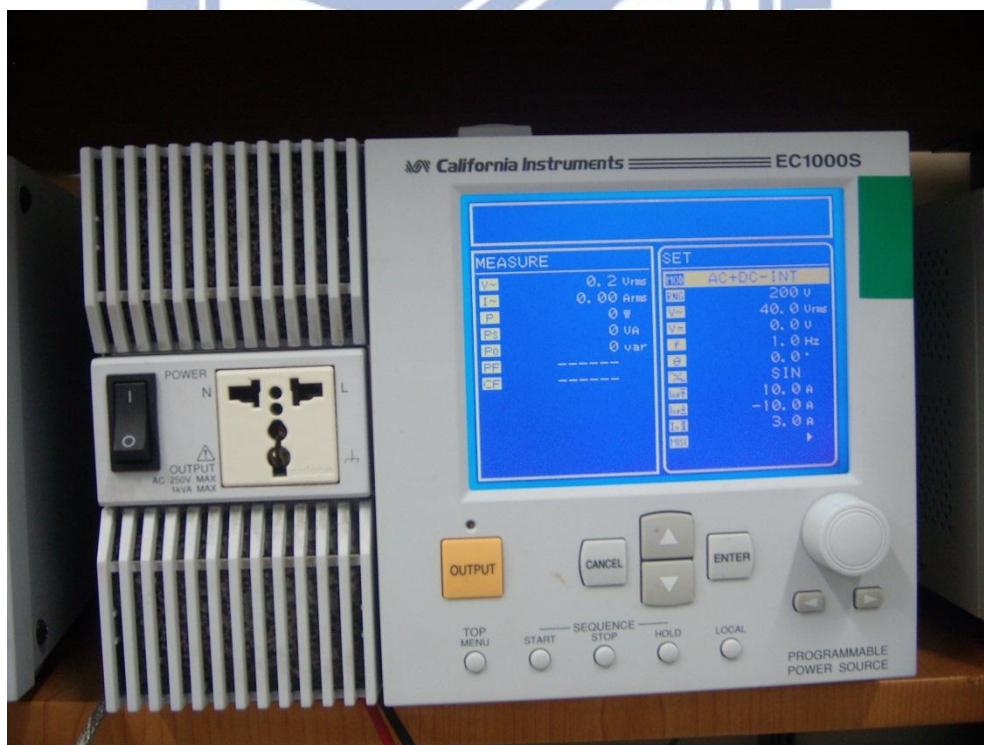


圖 2-6 交流電電源供應器

## 第三章 結果與討論

本研究主要目的在於研究磁性流體在圓管流場中、層流條件底下的熱傳表現，分別探討磁性流體在不同的體積分率以及  $Re$  的熱傳行為，再利用參考文獻中的經驗公式 Shah equation 與實驗結果作比較，建立磁性流體在不同體積分率下  $Re$  與  $Nu$  之關係。此外，利用磁性流體的磁導性，以不同的體積分率與溫度為變數的情況下，量測出相對應的感應電壓，並對量測出之感應電壓訊號做進一步的分析與比較。

### 3-1 磁性流體之熱傳行為

#### 3-1-1 純水在不同 $Re$ 下之熱傳情形

圖 3-1 為  $Re=931$ ，純水各點溫度與時間的變化圖，在圖中每條不同顏色的線代表每個熱電耦在不同時間下量取之溫度值，其中藍色曲線代表熱電耦編號  $TC1(x=80mm)$  所量測的溫度值，綠色曲線代表熱電耦編號  $TC2(x=180mm)$  所量測的溫度值，紅色曲線為熱電耦編號  $TC3(x=300mm)$  所量測的溫度值，淺藍色曲線為熱電耦編號  $TC4(x=400mm)$  所量測的溫度值，紫色曲線為熱電耦編號  $TC5(x=480mm)$  所量測的溫度值，黃色曲線為加熱區出口端之熱電耦  $T_{out}$  所量測的溫度值，黑色曲線為加熱區入口端之熱電耦  $T_{in}$  所量測的溫度值。從圖中可得知各個時間下的不同位置量測所得的溫度，由圖可以看出時間為 20 分鐘以後各點溫度已達穩態，比較管壁溫度大小則發現  $TC1(x=80mm)$  溫度為最低，接著是  $TC2(x=180mm)$  溫度為次低，而  $TC3(x=300mm)$ 、 $TC4(x=400mm)$  與  $TC5(x=480mm)$  的溫度相當接近，此時可以發現  $TC5$  溫度大約在  $31^{\circ}C$  左右，比較  $TC3$ 、 $TC4$  與  $TC5$  三者溫度大小為  $TC3 > TC4 > TC5$ ；理論上因流體流動時能將加熱片的熱量往後端帶走，越後端的管壁溫度應為較高，而  $TC5$  位置離圓管入口處最遠，其溫度應為最高，但實際測得的溫度大小為  $TC3 > TC4 > TC5$ ，為

不合理之現象，猜測其發生的原因可能為受熱之鋁管因前後兩端截面並無包覆隔熱層，導致熱量有軸方向的散失，以致於管壁本身產生軸向之溫度梯度，而 TC3 位在圓管的最中間處，在管中無流體時，比較其他位置之溫度，TC3 溫度為最大，因此當在低 Re 時流體無法有效的將熱量帶往至後端，導致 TC3 管壁溫度為最高的情況。另外其流體進口溫度  $T_{in}$  與流體出口溫度  $T_{out}$  的差值為  $3.6^{\circ}\text{C}$ 。圖 3-2 為純水在  $Re=931$ ，經計算後不同位置的熱傳係數，TC1( $x=80\text{mm}$ )的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數( $h$ )遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，但因如同上述有軸向有熱損失之因素，在低 Re 之下計算得到 TC3 位置的熱傳係數為最低，TC4 與 TC5 反而有增加的趨勢，雖然軸方向熱損失會導致 TC3 之熱傳係數為最低，但此原因對於熱傳係數計算的誤差則是非常小，且此現象僅在低 Re 下時才會發生，當調高 Re 時 TC3 之熱傳係數為最小之情形則會消失。

接著若將流場調至  $Re=1395$ ，其純水各點溫度與時間的變化如圖 3-3，圖中管壁溫度大小比較為  $TC1 < TC2 < TC3 < TC4 < TC5$ ，此時可以發現管壁的最大溫度為 TC5 的  $27^{\circ}\text{C}$  左右，與  $Re=931$  不同的是因流場的流速變快，熱量被帶到管圓管較後段之處，其後段管壁溫度因流體將熱量帶往後段而使得最後端的管壁溫度 TC5 溫度最大，而且其流體進口溫度  $T_{in}$  與流體出口溫度  $T_{out}$  的差值因流速變快而降低至  $2.2^{\circ}\text{C}$ ，各點溫度之穩定時間也略為縮短，約在 15 分鐘後達到穩態。圖 3-4 為純水在  $Re=1395$  不同位置的熱傳係數，TC1 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，熱傳係數也亦漸平緩，然而比對圖 3-2，在位置 TC1 與 TC2 的熱傳係數有明顯增加的情況而位置 TC3、TC4、TC5 有些微的增加但增加的大小較不明顯，所以從此可看出當流速增加時加熱前端的熱傳係數會有較顯著的增加。

當純水流速增大為  $Re=1861$  時，其純水各點溫度與時間的變化如圖 3-5，圖中各位置管壁溫度大小為  $TC5 > TC4 > TC3 > TC2 > TC1$ ，因流場速度更快，流體熱

量的傳遞越明顯，其 TC3、TC4 與 TC5 的溫度差也越顯著，而且其流體進口溫度  $T_{in}$  與流體出口溫度  $T_{out}$  的差值因流速變快而降低至  $1.6^{\circ}\text{C}$ ，各點溫度之所需到達穩定的時間也有縮短的情形，達穩態的時間約為 14 分鐘；另外，觀察 TC3、TC4 與 TC5 的曲線，發現在溫度穩定時會有些許的波動，因流場中的  $Re=1861$  已快接近圓管層流  $Re$  上限的理論值  $Re=2100$ ，所以當  $Re$  越大時，流場中越會因邊界層分離之現象產生流場不穩定之現象，所以其溫度也會有不穩定的現象情況發生，在此實驗並無非常明顯之不穩定現象，往後的實驗將會使  $Re$  接近 2100，此時不穩定現象會非常明顯，此現象將會在後面做介紹。圖 3-6 為純水在  $Re=1861$  不同位置的熱傳係數，因 TC1 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，熱傳係數也亦漸平緩，且其熱傳係數也因流速增加而有明顯增加的趨勢，比較 TC1~TC5 五個位置在不同  $Re$  的熱傳係數，當  $Re$  增加時，離入口處越近之位置的熱傳係數增加的幅度也最大。

### 3-1-2 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在不同 $Re$ 下之熱傳情形

接著嘗試添加磁性流體於純水中，形成流體中具有奈米粒子的奈米流體，討論其熱傳效果與磁性流體的體積分率之關係。圖 3-7 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=815$ ，各點溫度與時間的變化圖，由圖中可得知各個時間下的不同位置量測所得的溫度，如同先前所提及的有軸向熱量損失，導致管壁本身有軸向溫度梯度，在低  $Re$  下熱量容易累積在受熱鋁管中間的位置，以致於 TC3 的溫度為最大。圖 3-8 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=815$  時，不同位置的熱傳係數，同樣的 TC1 位置的熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，但因軸向熱損失之因素，計算得到 TC3 位置的熱傳係數為最低，TC4 與 TC5 反而有增加的趨勢。

圖 3-9 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1112$ ，各點溫度與時間的變化圖，其管壁溫度隨著位置而增加，管壁溫度大小為  $TC5 > TC4 > TC3 > TC2 > TC1$ ，因其流場的



流速增加，熱量也隨著流速增加而更能使熱量傳遞至鋁管後段，而各點管壁溫度因流速增加而下降。圖 3-10 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1112$  時不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨著離入口端越遠使得熱傳效果越差，TC1 的熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，熱傳係數隨著離入口端位置越趨於平緩，此外，比較於在  $Re=815$  的熱傳係數， $Re$  增加會使整體的熱傳係數均為提升，以 TC1 位置的熱傳係數提升最為顯著。

隨著  $Re$  的提高，各點的熱傳效果也愈好。圖 3-11 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1482$  時各點溫度與時間的變化圖，其管壁溫度隨著位置而增加，個位置的溫度也因流速增加更能帶走熱量而降低。圖 3-12 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1482$  時不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨著離入口端越遠使得熱傳效果越差，越往後端熱傳的效果越差，熱傳係數也亦漸平緩。

當磁性流體( $\Phi=0.05$ )增加為  $Re=1852$  時，其溫度也較為不穩定。圖 3-13 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1852$  時各點溫度與時間的變化圖，可以看出 TC3、TC4、TC5 的溫度曲線有明顯的波動，此為溫度之不穩定現象。因  $Re$  接近於流場之層流與紊流之間的過渡流( $2100 < Re < 4000$ )，而使得流場開始產生不穩定的現象，進而影響溫度產生不穩定的現象。圖 3-14 為磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1852$  不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨位置增加而下降，且有逐漸平緩的趨勢。

### 3-1-3 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在不同 $Re$ 下之熱傳情形

圖 3-15 為  $Re=677$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖，如同先前所提及的有軸向熱量損失，且在低  $Re$  下熱量容易累積在受熱鋁管中間的位置，以致於 TC3 的溫度為最大。圖 3-16 為磁性流體( $\Phi=0.1$ ) 在  $Re=677$  時，不同位置的熱傳係數，TC1 的位置最接近流體的加熱進口端，所以其熱傳係數遠大於其他四個位置的熱傳係數，越往後端熱傳的效果越差，但因軸向熱損失之因素，

計算得到 TC3 位置的熱傳係數為最低，TC4 與 TC5 反而有增加的趨勢。

圖 3-17 為磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=1015$ ，各點溫度與時間的變化圖，由圖可以得知此情況下的 TC3、TC4、TC5 的溫度差距非常小，大約差值在  $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$  左右，仔細比較其三者之溫度大小則是  $TC3 < TC4 < TC5$ ，當  $\Phi=0.1$ ， $Re$  約為 1015 時，這時流場之流速剛好夠大，已足夠將熱量帶往後段區，使得溫度不會像低  $Re(Re=677)$  時後端溫度反而降低的情況。圖 3-18 為磁性流體( $\Phi=0.1$ ) 在  $Re=1015$  時，不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨離入口端位置的增加而降低，且有逐漸平緩的趨勢。

圖 3-19 為  $Re=1353$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖，由於  $Re$  的增加，各點的管壁溫度也隨之下降，比較管壁的溫度，離入口端越遠，因熱量隨流體而往後帶以至於溫度越高。圖 3-20 為磁性流體( $\Phi=0.1$ ) 在  $Re=1353$  時，不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨離入口端位置的增加而降低，且有逐漸平緩的趨勢。圖 3-21 為  $Re=1690$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-22 為磁性流體( $\Phi=0.1$ ) 在  $Re=1690$  時，不同位置的熱傳係數，其熱傳表現趨勢與  $Re=1353$  相去不遠。

圖 3-23 為  $Re=2028$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖，由這裡可以看出與前面較低  $Re$  的穩度時間圖有很大的差異，除了 TC3、TC4、TC5 溫度有很顯著的不穩定，TC4 與 TC5 的溫度且在 4 分鐘時有漸平緩的趨勢，直到實驗結束，可以由圖觀察出 4 分鐘以後  $TC5$  溫度  $<$   $TC4$  溫度  $<$   $TC3$  溫度，但此情況低  $Re(Re=677)$  又與的狀況不同，因此可由此判斷應為  $Re$  過大，在流場中已發生紊流的情況，所以在後段形成邊界層分離而產生紊流，因紊流中的能量傳遞的情況較好，所以使 TC4 與 TC5 的溫度下降。圖 3-24 為磁性流體( $\Phi=0.1$ ) 在  $Re=2028$  時不同位置的熱傳係數，因在 TC4 與 TC5 因產生紊流的情況，此兩個位置的熱傳係數反而不降反升。

### 3-1-4 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在不同 Re 下之熱傳情形

圖 3-25 為  $Re=525$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，與先前低體積分率比較下，此實驗的  $Re$  更低但沒有發生  $TC3$  溫度  $>$   $TC4$  溫度  $>$   $TC5$  溫度的情形，是因為高體積分率的磁性流體熱傳性質較良好，而熱傳的效應大過於先前所提及的有軸向熱量損失導致的垂直管壁的熱通量不平均的效應。圖 3-26 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=525$  時，不同位置的熱傳係數，因上述的情形，此熱傳係數就有很漂亮的趨勢，離入口端越遠，熱傳係數則越下降而且逐漸平緩。

圖 3-27 為  $Re=743$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-28 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=743$  時，不同位置的熱傳係數。圖 3-29 為  $Re=969$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-30 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=969$  時，不同位置的熱傳係數。圖 3-31 為  $Re=1292$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-32 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=1292$  時，不同位置的熱傳係數。圖 3-33 為  $Re=1526$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-34 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=1526$  時，不同位置的熱傳係數。圖 3-35 為  $Re=1780$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，圖 3-36 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=1780$  時，不同位置的熱傳係數。此五組實驗的溫度與熱傳係數的趨勢相似，以下統一做為說明:由於  $Re$  的增加，各點的管壁溫度也隨之下降;而比較管壁的溫度，離入口端越遠，因熱量隨流體而往後帶以至於溫度越高;另外，不同位置的熱傳係數，熱傳係數隨離入口端位置的增加而降低，且有逐漸平緩的趨勢。

圖 3-37 為  $Re=2035$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖，從此張圖就能與先前的溫度時間變化圖看出有很大的差異性，除了  $TC3$ 、 $TC4$ 、 $TC5$  的溫度有很顯著的不穩定，且在加熱沒多久  $TC3$ 、 $TC4$ 、 $TC5$  的溫度就已有平緩的趨勢，甚至  $TC4$  與  $TC5$  的溫度還較  $TC2$  的溫度低，此情形是因為  $Re$  過大，在流場中已發生紊流的情況，所以在後段形成邊界層分離而產生紊流，因紊流中的

能量傳遞的情況較好，所以使 TC4 與 TC5 的溫度比 TC2 及 TC3 還低;此實驗比較圖 3-23(圖 3-23 為  $Re=2028$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖)，有更強烈的紊流情況。圖 3-38 為磁性流體( $\Phi=0.2$ ) 在  $Re=2035$  時，不同位置的熱傳係數，此因 TC4 與 TC5 位置的熱傳效應因紊流情況而提高，導致 TC4 與 TC5 位置的熱傳係數反而比 TC3 位置的熱傳係數還高，甚至比 TC2 位置的熱傳係數還高。

### 3-1-5 在相近的 $Re$ 下，比較不同體積分率 $\Phi$ 的磁性流體之熱傳情形

本實驗在此小節欲比較相同的  $Re$  下，磁性流體不同體積分率對於熱傳係數影響之差異性，但因實際上本實驗無法非常精準控制不同體積分率的磁性流體均在於相同  $Re$  之下，因此將比較  $Re$  相近的條件下，不同體積分率的磁性流體之熱傳係數的差異。首先將所有的數據互相比較下挑出兩組來做比較，一組是  $Re$  約為 1350 下不同體積分率之熱傳係數的比較，一組是  $Re$  約為 1850 下不同體積分率之熱傳係數的比較。圖 3-39 比較  $Re \approx 1350$ ，磁性流體不同體積分率對熱傳係數的差異性:分別比較純水( $Re=1395$ )、磁性流體  $\Phi=0.1(Re=1353)$ 與磁性流體  $\Phi=0.2(Re=1292)$ 三者的熱傳係數，雖然磁性流體  $\Phi=0.2$  的  $Re$  較小，但是依舊可以看出增加磁性流體的體積分率，能使熱傳性質有效的提升。圖 3-40 比較  $Re \approx 1850$  磁性流體不同體積分率對熱傳係數的差異性:分別比較純水( $Re=1861$ )、磁性流體  $\Phi=0.05(Re=1852)$ 、磁性流體  $\Phi=0.2(Re=1780)$ ;此三個數據的  $Re$  更為接近，更能看出其差異性，磁性流體( $\Phi=0.2$ )在各位置的熱傳係數有很明顯的差異，在相近的  $Re$  之下，增加磁性流體的粒子濃度，能使熱傳性質有效的提升。

為了更了解各參數下熱傳性質的變化，將實驗的數據做無因次化建立磁性流體平均  $Nu$  與  $Re$  的關係圖， $Nu$  的計算參考公式(2)，且將各個位置的  $Nu$  作為平均，以平均  $Nu$  作為一個數據之熱傳強度的參考，並且將實驗結果與文獻中前人的經驗公式 Shah equation(如公式(5))做比較，其方程式用於層流底下、完全發

展流的流場，且固定熱通量的條件下。在計算  $Re$  時，需要得知不同狀態下的磁性流體之黏滯度，而為了實驗的準確性，其中黏滯度對於溫度高低有很大的關係，所以黏滯度為溫度的函數，而流體使用的溫度為  $T_{in}$  與  $T_{out}$  的平均值，其中圖 3-41 為磁性流體之黏滯度與溫度的關係圖。圖 3-42 為不同體積分率下的平均  $Nu$  與  $Re$  的關係圖，其中藍色曲線代表是利用 Shah equation 在純水下的平均  $Nu$  之曲線，綠色曲線為實驗中純水的平均  $Nu$  之曲線，淺藍色曲線為實驗中磁性流體( $\Phi=0.05$ )的平均  $Nu$  之曲線，黃色曲線為實驗中磁性流體( $\Phi=0.1$ )的平均  $Nu$  之曲線，紅色曲線為實驗中磁性流體( $\Phi=0.2$ )的平均  $Nu$  之曲線，由此圖可以觀察到實驗中純水的熱傳曲線以及 Shah 方程式在  $Re=931$  時非常符合，在  $Re=1395$  誤差約 4.1% 左右，在  $Re=1861$  誤差約 8% 左右，此誤差的來源是本實驗在流場中並不為完全發展流，在入口端處邊界層厚度隨著位置的增加而變厚，而 Shah equation 為在完全發展流的狀態下，所以實驗中當  $Re$  提升時會使入口區 (entrance region) 長度增加，因邊界層厚度成長較慢而使熱端前端的熱傳強度增加，以至於當  $Re$  增加時實驗數據與 Shah equation 的誤差值逐漸變大，若能改善實驗裝置使流場均為完全發展流時，實驗數據則會與 Shah equation 非常符合。而比較實驗中純水的平均  $Nu$  以及實驗中磁性流體的平均  $Nu$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )之平均  $Nu$  較於純水在低雷諾數( $Re=1000$ )時增加約 3.8% 而在高雷諾數( $Re=1500$ )增加約 5.8%；而磁性流體( $\Phi=0.1$ )之平均  $Nu$  較於純水在低雷諾數( $Re=1000$ )時增加約 11.2% 而在高雷諾數( $Re=1500$ )增加約 22.4%；而磁性流體( $\Phi=0.2$ )之平均  $Nu$  較於純水在低雷諾數( $Re=1000$ )時增加約 17.2% 而在高雷諾數( $Re=1500$ )增加約 27.6%；因此可以知道提高流體的  $Re$  或是添加更多的奈米粒子於流體之中，對於流體的熱傳性質皆有所提升。

## 3-2 磁性流體之訊號量測

### 3-2-1 以體積分率為變數之感應電壓比較

為了將數據量化，本文將感應電壓的振幅定義為感應電壓的大小，因激磁線圈輸入電壓頻率為 1Hz，輸入時間為 60 秒，故會使感應線圈產生 60 秒、頻率為 1Hz 的感應訊號，其感應訊號呈正弦波的形式，所以本文擷取感應電壓的大小是將訊號之每個波峰值取出，如圖 3-43 所示，紅色圓圈內為擷取之波峰值，取感應訊號之 60 個波峰值再將全部的波峰值取平均值以求數據之精確度，作為感應電壓大小之值。

本文探討體積分率為變數之感應電壓比較，量測磁性流體在不同體積分率時所產生的感應電壓之大小，圖 3-44 中比較 APG830 磁性流體在  $\Phi=0$  和  $\Phi=0.2$  各產生的感應電壓，左側振幅較小為  $\Phi=0$  之感應電壓而右側振幅較大為  $\Phi=0.2$  之感應電壓，從此可以看出  $\Phi=0.2$  所產生的感應電壓大小較大，將  $\Phi=0$  與  $\Phi=0.2$  個別的感應電壓大小計算出，其感應電壓大小的比值約為 1.08，換言之當增加磁性流體的體積分率為  $\Phi=0.2$  時，所增加的感應電壓大小約為 8%。而圖 3-45 比較 APG830 磁性流體在  $\Phi=1$  和  $\Phi=0$  各產生的感應電壓，左側振幅較大為  $\Phi=1$  之感應電壓而右側振幅較小為  $\Phi=0$  之感應電壓，其最大平均感應電壓的比值約為 1.40，增加磁性流體的體積分率為  $\Phi=1$  時，所增加的感應電壓大小約為 40%。比較圖 3-44 與圖 3-45 所計算出來的感應電壓大小值，將不同體積分率的磁性流體所產生的感應電壓大小與無磁性流體( $\Phi=0$ )所產生的感應電壓大小取其差值所得到的感應電壓差，發現其感應電壓差與磁性流體的體積分率呈線性之關係，此結果與文獻[10]互相符合，也證實本實驗確實可以精準的量取磁性流體的體積分率與所產生的感應電壓之關係。

### 3-2-2 以溫度為變數之感應電壓比較

圖 3-46 為磁性流體( $\Phi=0.1$ )不同溫度對感應電壓之影響，其中圖中的橫坐標為時間，縱座標為感應電壓，而藍色圓圈代表磁性流體溫度為 11°C 各時間的感應電壓之波峰值，綠色圓圈代表磁性流體溫度為 45°C 各時間的感應電壓之波峰

值，紅色圓圈代表磁性流體溫度為  $60^{\circ}\text{C}$  各時間的感應電壓之波峰值，得其波峰值在將每個時間的波峰值做平均得到一溫度下的感應電壓大小之平均數，其中藍色直線代表磁性流體溫度為  $11^{\circ}\text{C}$  時感應電壓大小的平均值，綠色直線代表磁性流體溫度為  $45^{\circ}\text{C}$  時感應電壓大小的平均值，紅色直線代表磁性流體溫度為  $60^{\circ}\text{C}$  時感應電壓大小的平均值。由此看出雖然同一溫度下不同時間的波峰值之差異性頗大，但利用平均值計算方法依舊可以看出溫度對於磁性流體之感應電壓的變化，當磁性流體的溫度越低，使得其磁性流體的磁化強度也越強，所以感應電壓亦會越大；相反的當磁性流體溫度越高時，其磁化強度也越小，所量取的感應電壓也會越小。同樣的當磁性流體的體積分率增加到  $\Phi=0.2$  時，磁性流體不同溫度亦會對所產生的感應電壓大小造成影響，圖 3-47 為磁性流體( $\Phi=0.2$ )不同溫度對感應電壓之影響，如同  $\Phi=0.1$  的情況下，當磁性流體的溫度提高時，使得使得其磁性流體的磁化強度也越弱，導致所量取到的感應電壓大小也會越小。

接者比較磁性流體  $\Phi=0.1$  與  $\Phi=0.2$  在不同的溫度下所量取感應電壓大小之實驗數據繪製成圖 3-48，圖 3-48 為不同體積分率下所量測的感應電壓與溫度之關係圖，由此圖可以明顯的看出上述提及的提高溫度會使感應電壓大小下降之外，在此可以看出  $\Phi=0.2$  的下降的趨勢比  $\Phi=0.1$  還要明顯；在磁性流體之體積分率為  $\Phi=0.2$  時，溫度從  $20^{\circ}\text{C}$  上升到  $60^{\circ}\text{C}$ ，電壓約下降  $4*10^{-4}$  伏特，而當磁性流體的體積分率為  $\Phi=0.1$  時，溫度從  $20^{\circ}\text{C}$  上升到  $60^{\circ}\text{C}$ ，電壓約下降  $2*10^{-4}$  伏特，因此可知道磁性流體的體積分率較高時，增加相同的溫度差會使得所量測的感應電壓下降的幅度更大，且可以歸納得知當增加相同的溫度差之下，其磁性流體的體積分率之比值會與感應電壓大小的下降量之比值成正比的關係，此結果與磁性流體的磁化強度與溫度的曲線(圖 1-10)的趨勢是非常符合的。

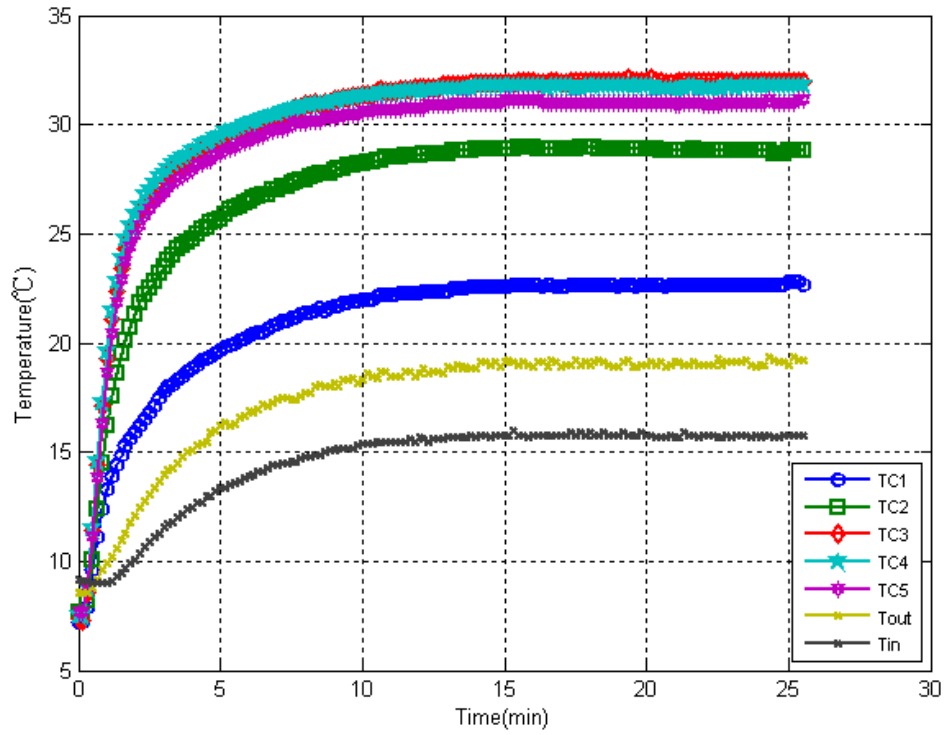


圖 3-1 在  $Re=931$ ，純水各點溫度與時間的變化圖

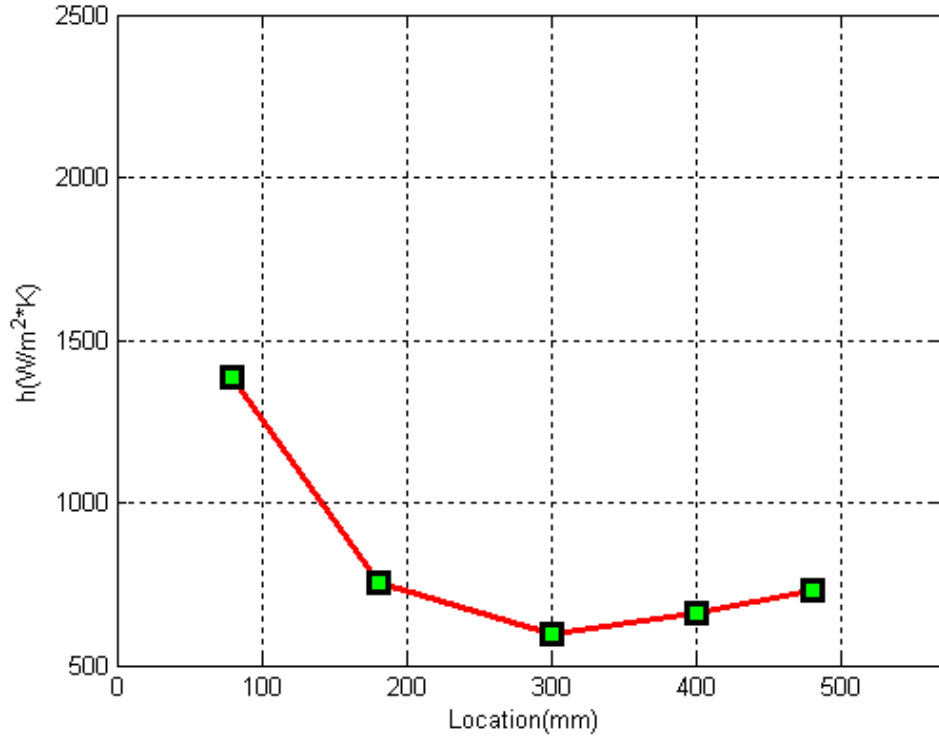


圖 3-2 純水在  $Re=931$ ，不同位置的熱傳係數



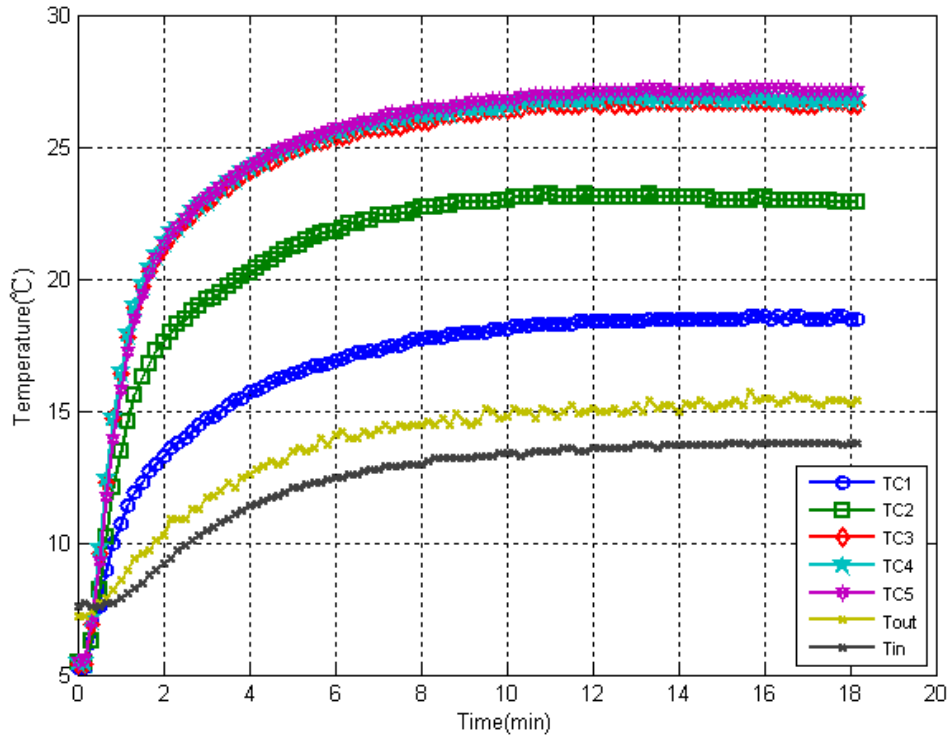


圖 3-3 在  $Re=1395$ ，純水各點溫度與時間的變化圖

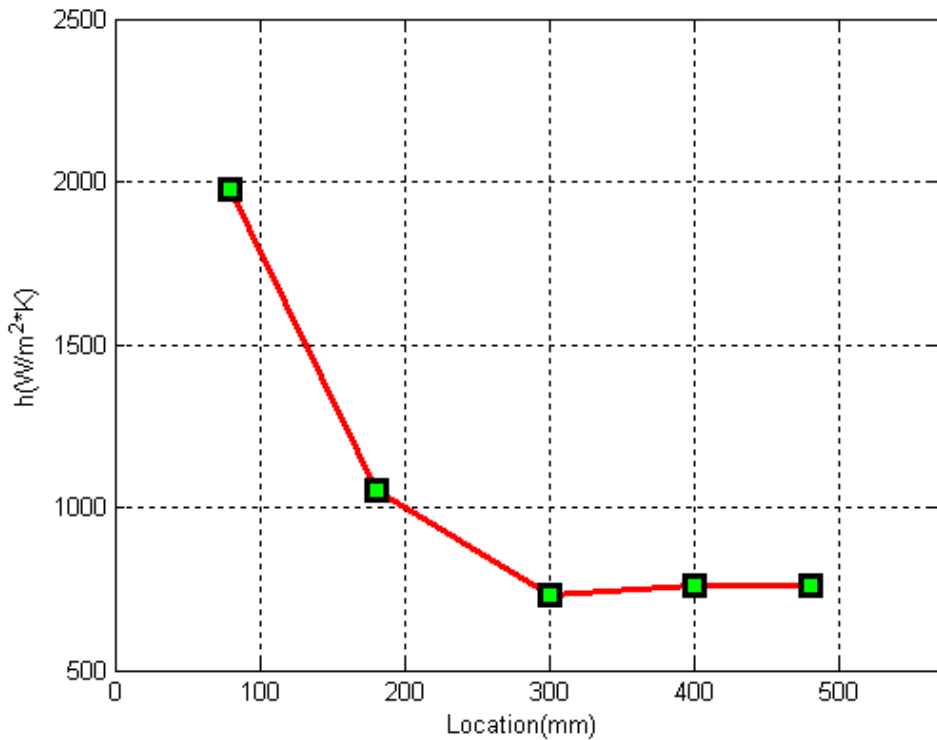


圖 3-4 純水在  $Re=1395$ ，不同位置下的熱傳係數

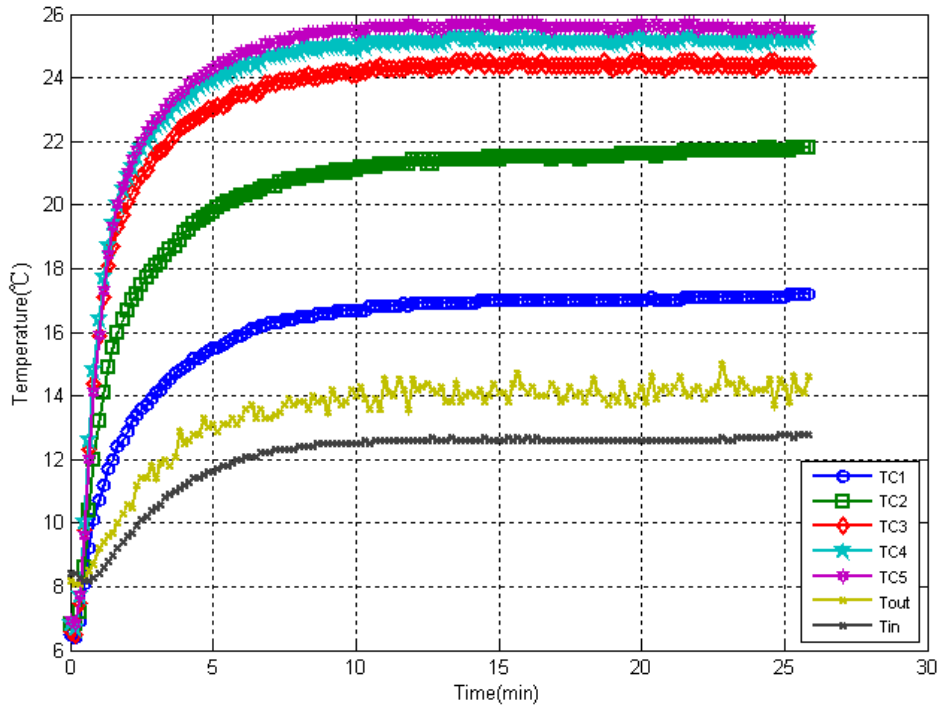


圖 3-5 在  $Re=1861$ ，純水各點溫度與時間的變化圖

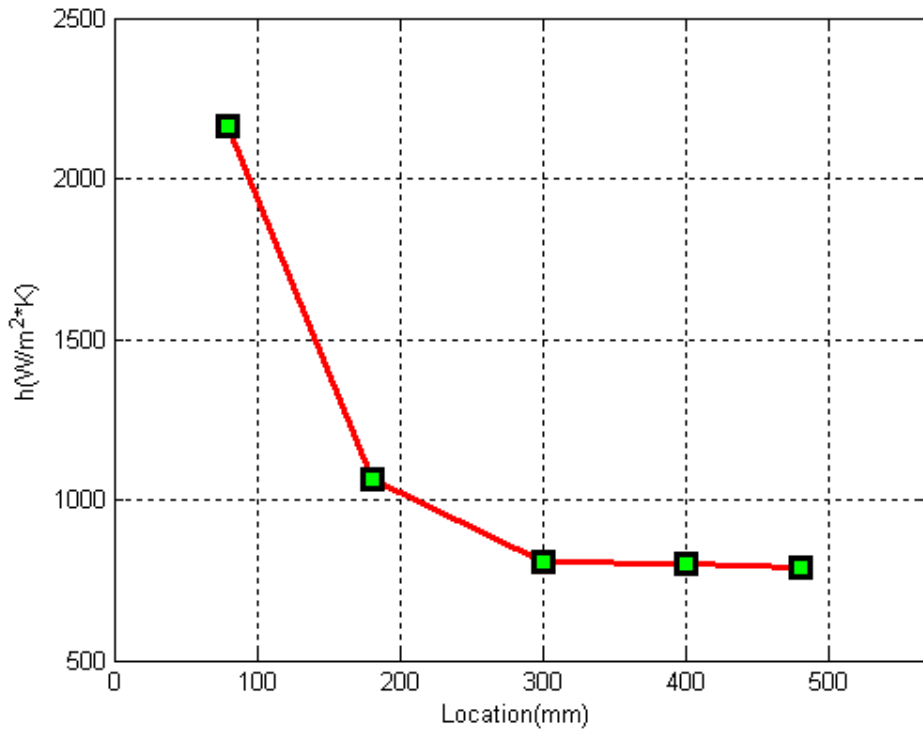


圖 3-6 純水在  $Re=1861$ ，不同位置下的熱傳係數

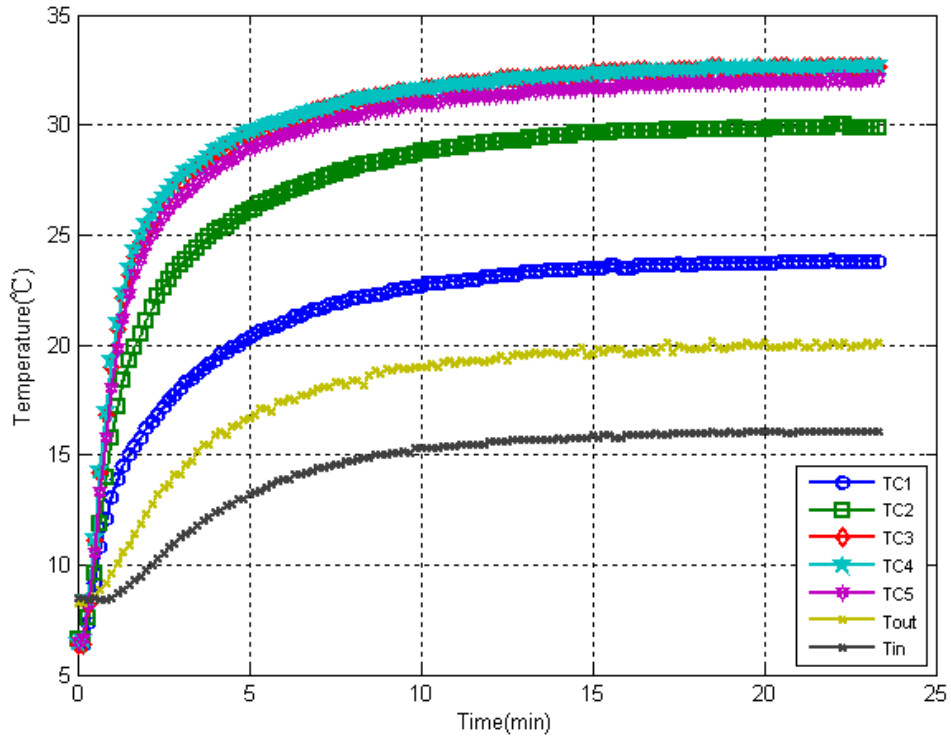


圖 3-7 在  $Re=815$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖

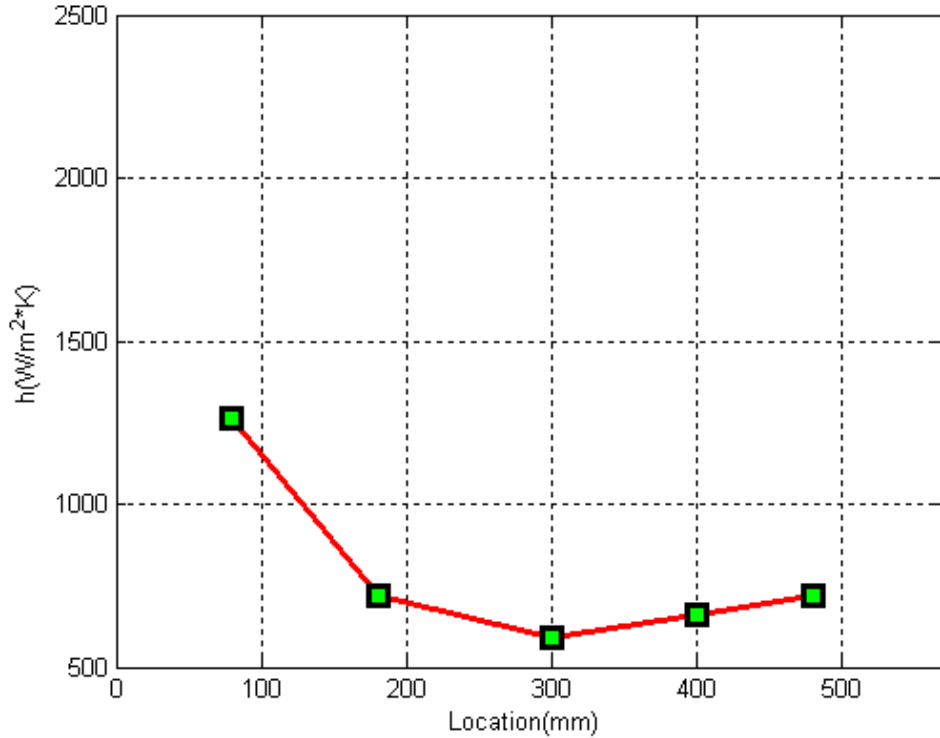


圖 3-8 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=815$ ，不同位置下的熱傳係數

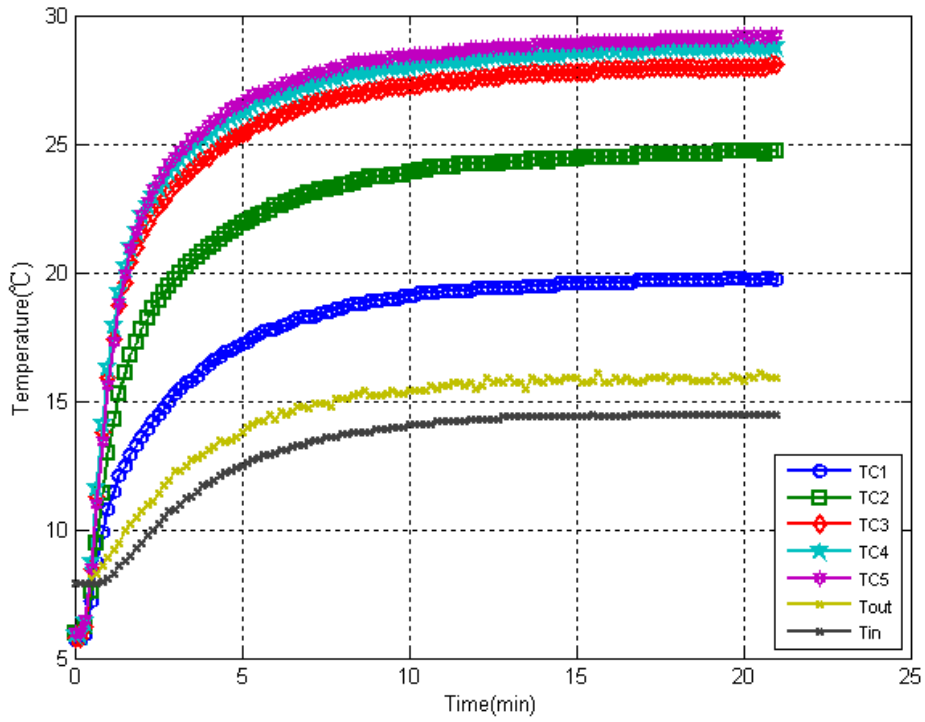


圖 3-9 在  $Re=1112$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖

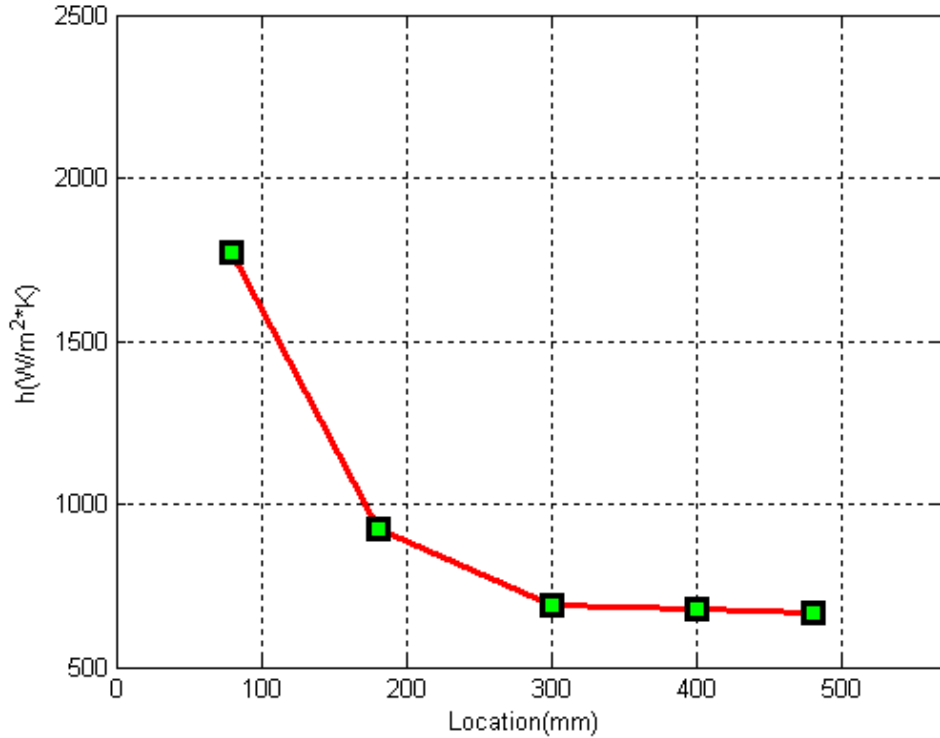


圖 3-10 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1112$ ，不同位置下的熱傳係數

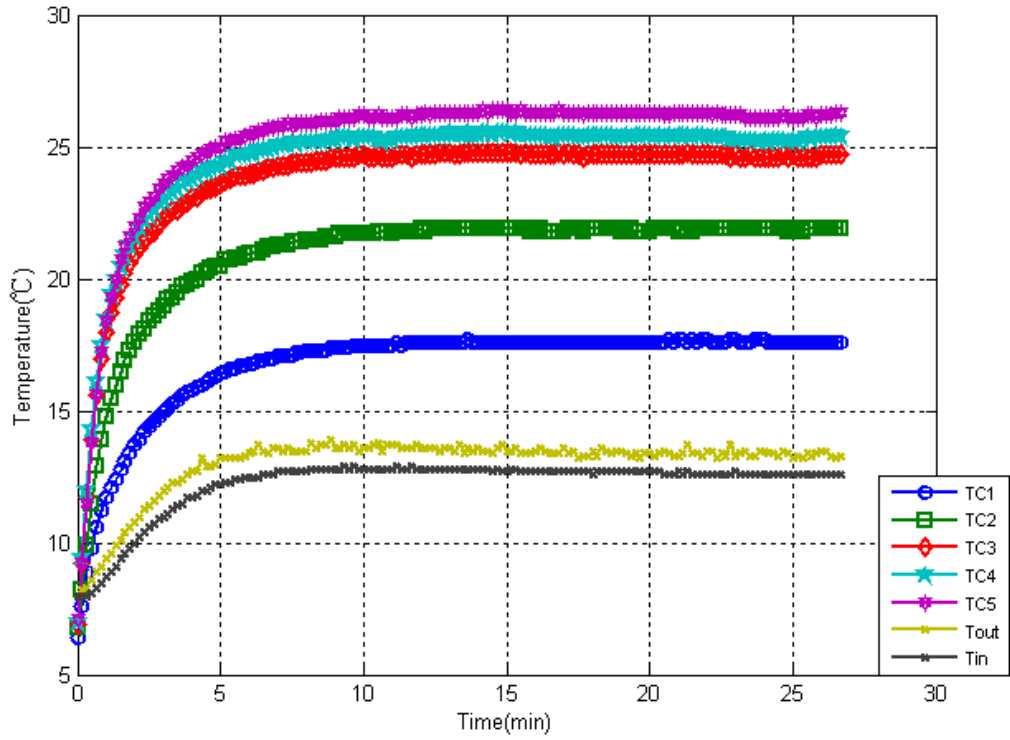


圖 3- 11 在  $Re=1482$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖

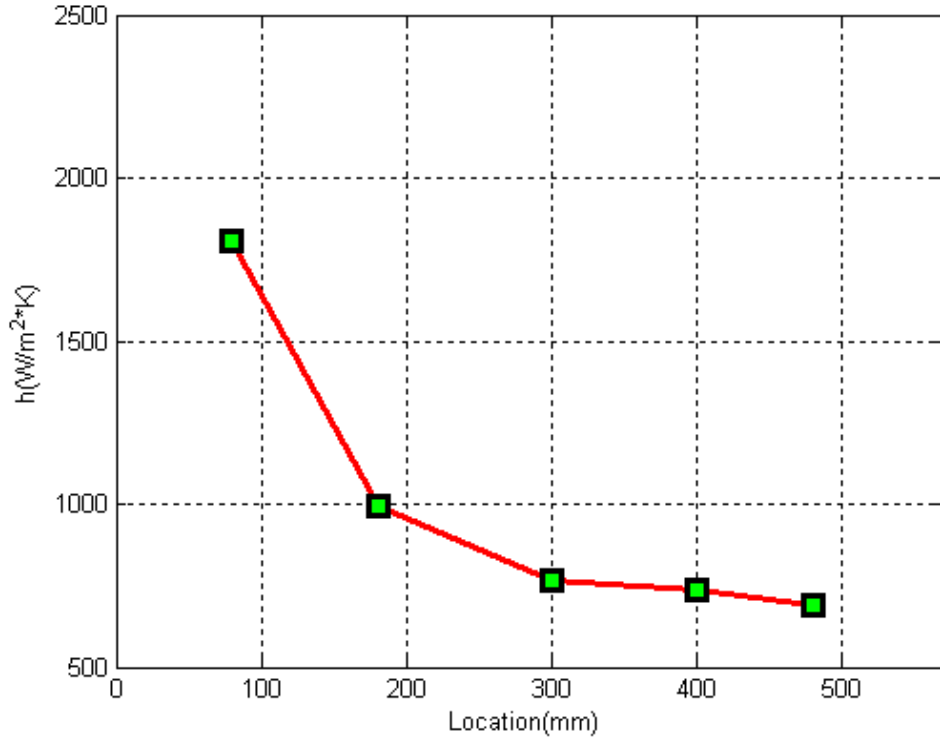


圖 3- 12 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1482$ ，不同位置下的熱傳係數

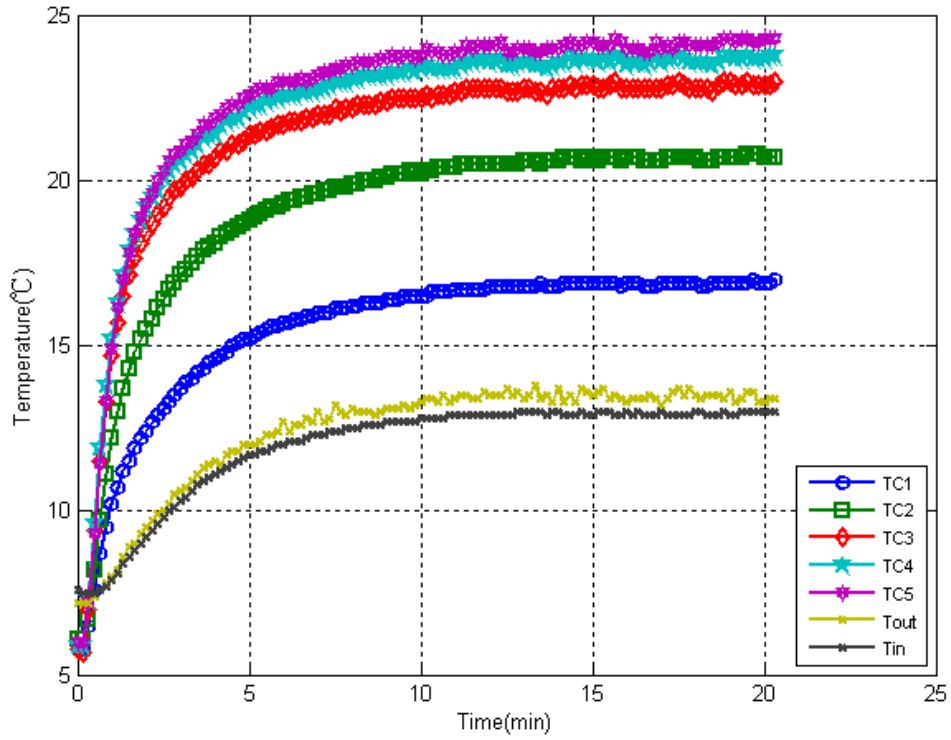


圖 3- 13 在  $Re=1852$ ，磁性流體( $\Phi=0.05$ )各點溫度與時間的變化圖

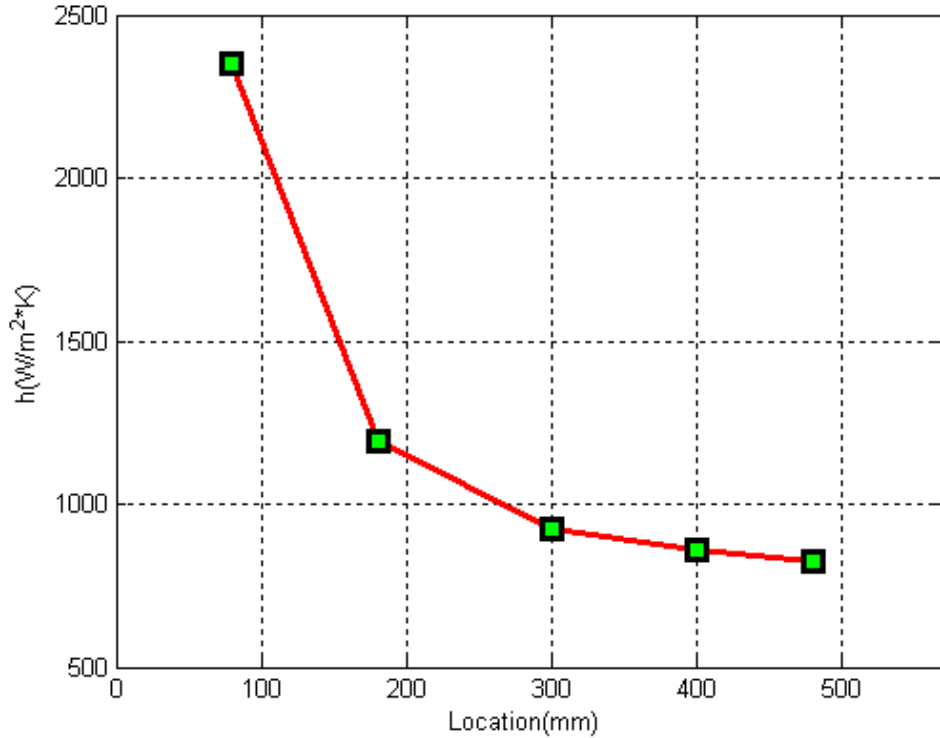


圖 3- 14 磁性流體( $\Phi=0.05$ )在  $Re=1852$ ，不同位置下的熱傳係數

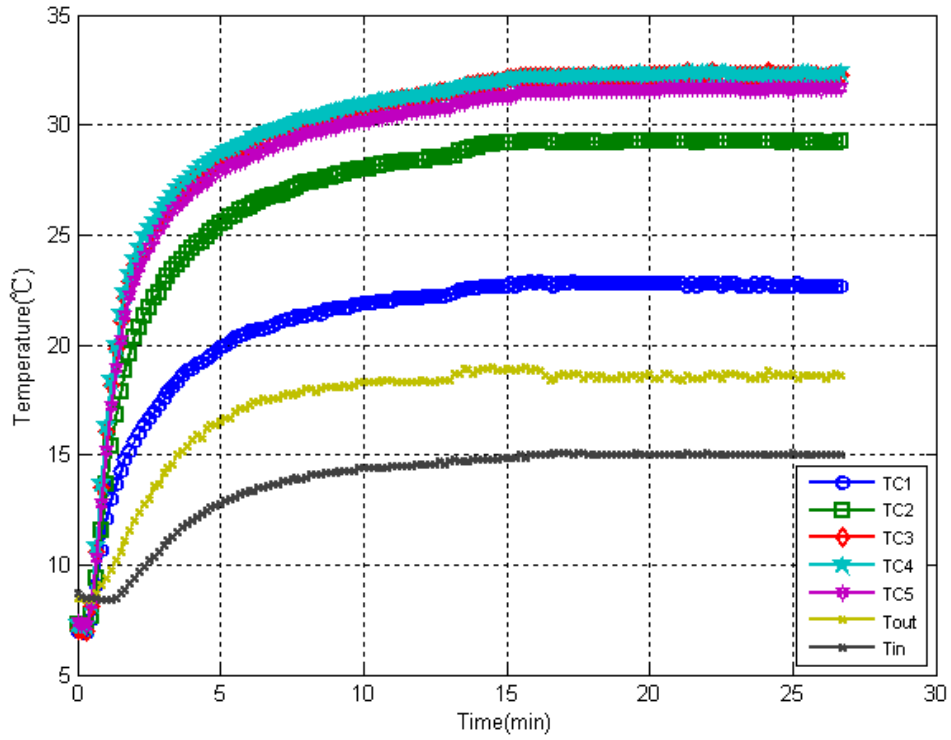


圖 3-15 在  $Re=677$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖

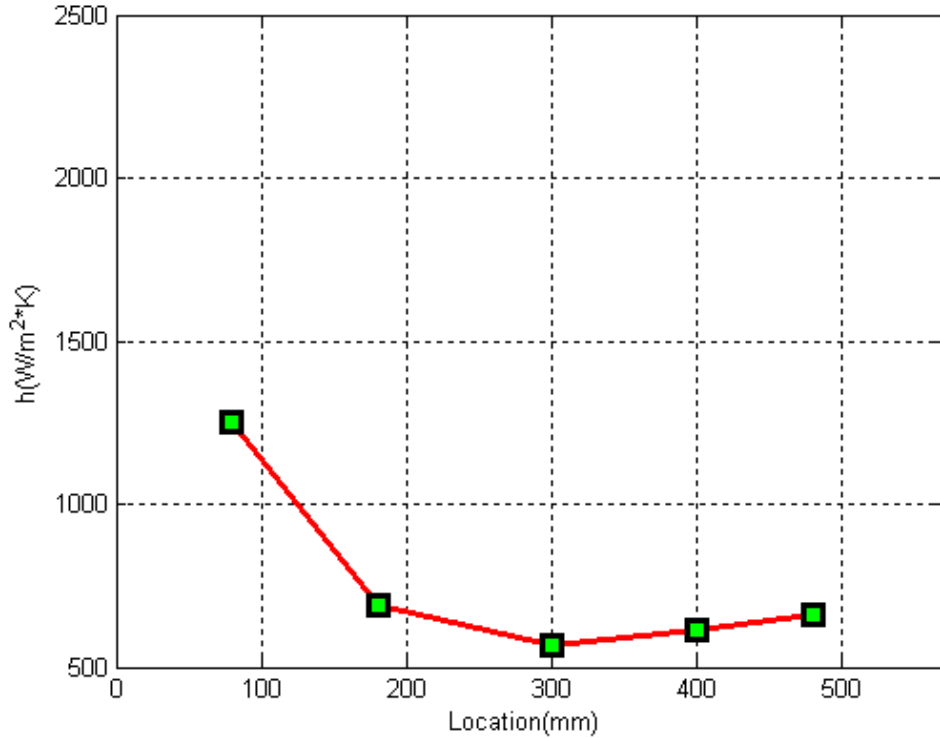


圖 3-16 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=677$ ，不同位置下的熱傳係數

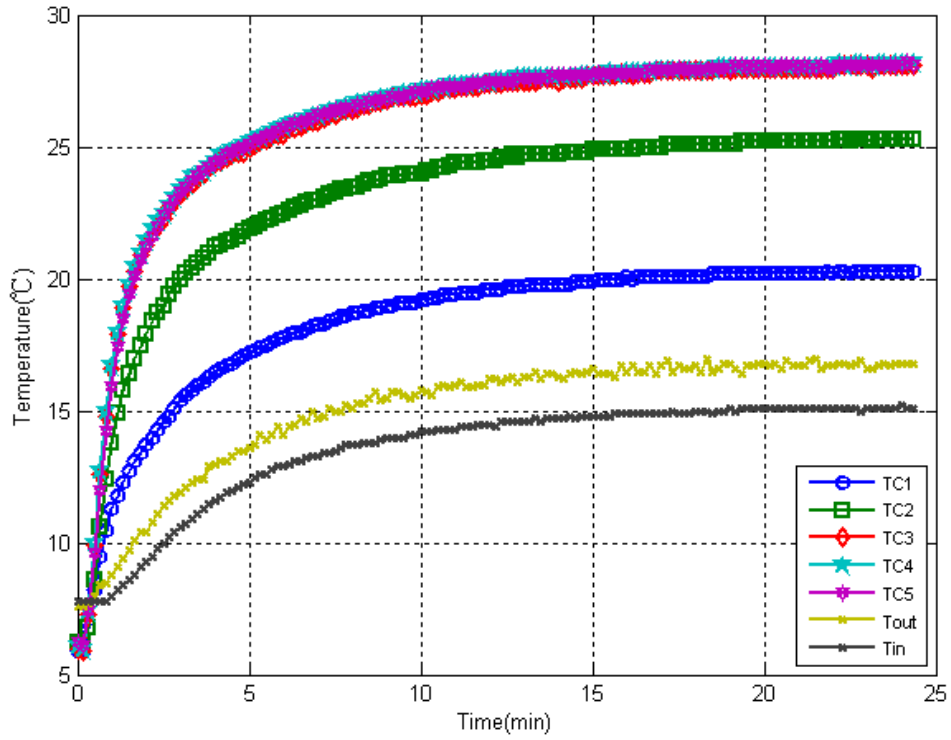


圖 3-17 在  $Re=1015$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖

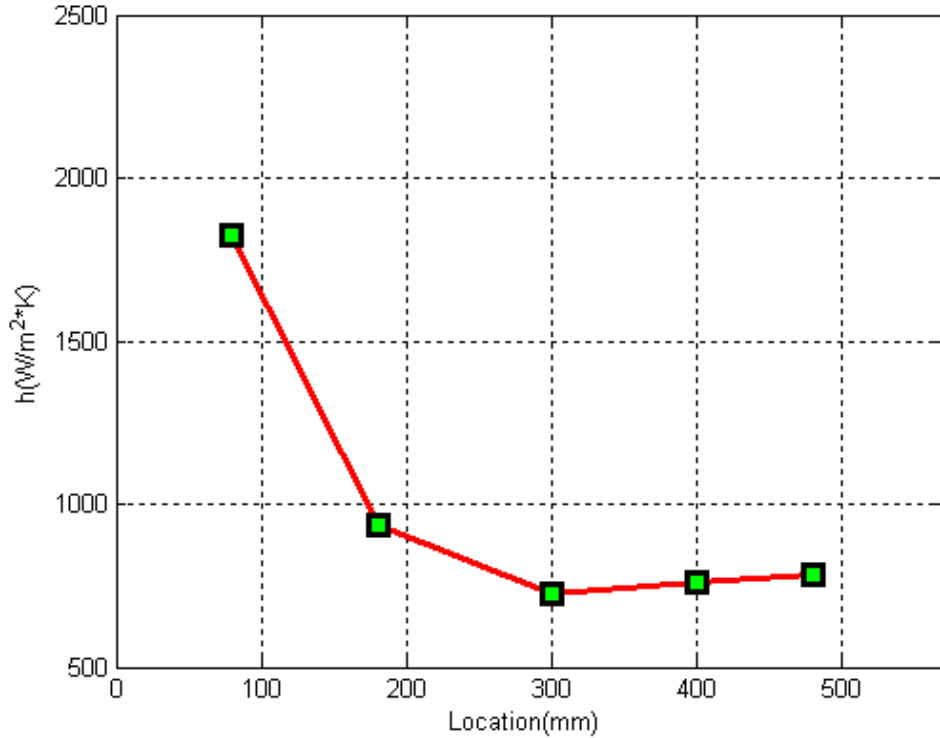


圖 3-18 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=1015$ ，不同位置下的熱傳係數



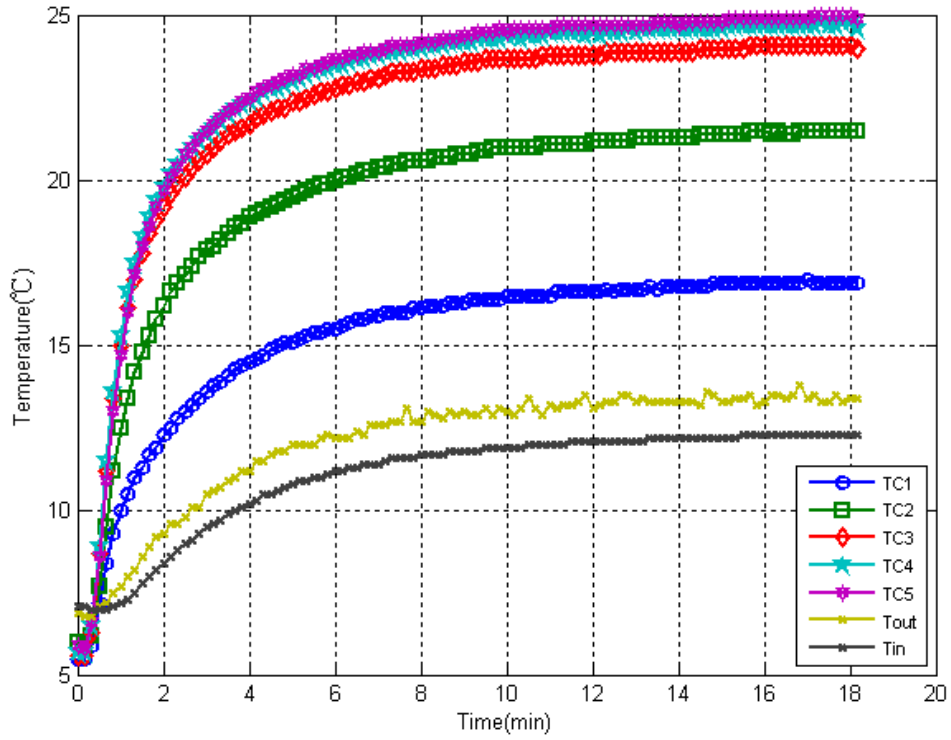


圖 3- 19 在  $Re=1353$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖

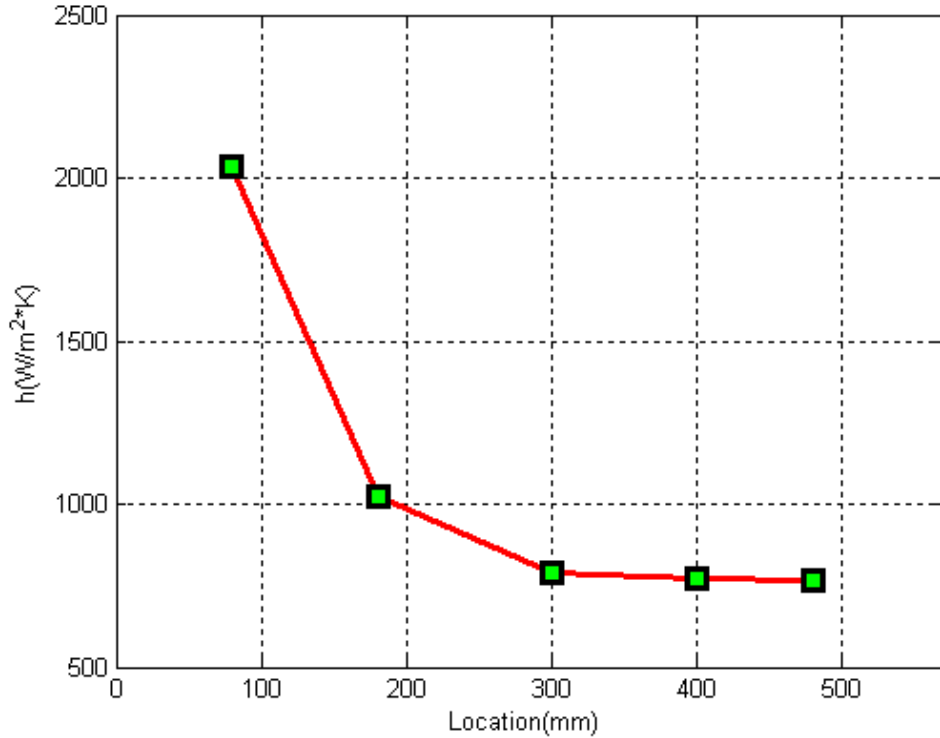


圖 3- 20 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=1353$ ，不同位置下的熱傳係數

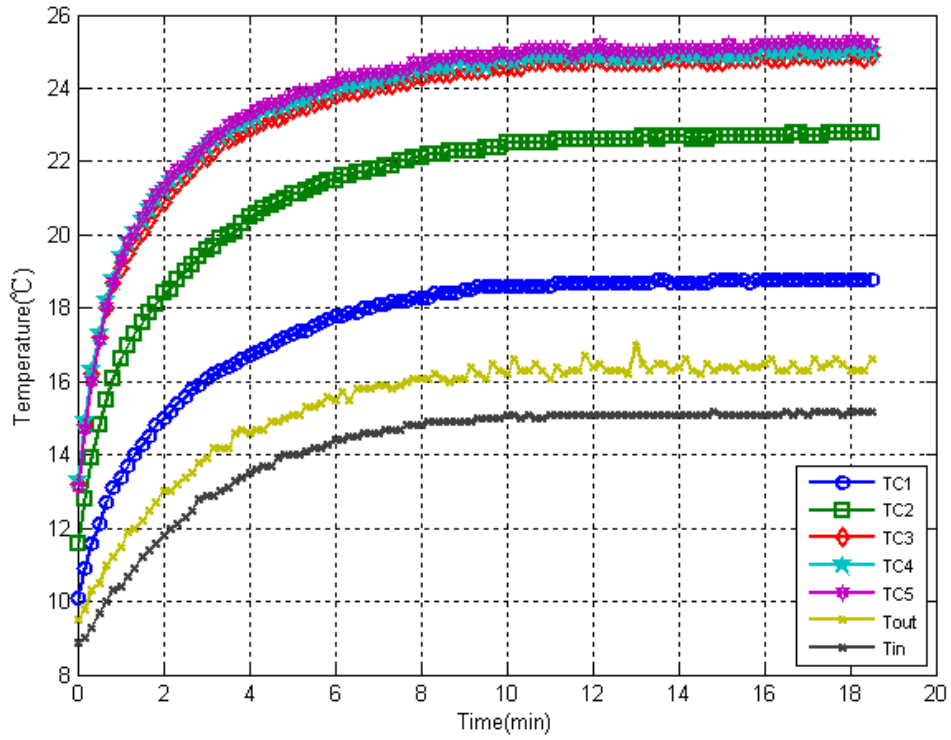


圖 3- 21 在  $Re=1690$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖

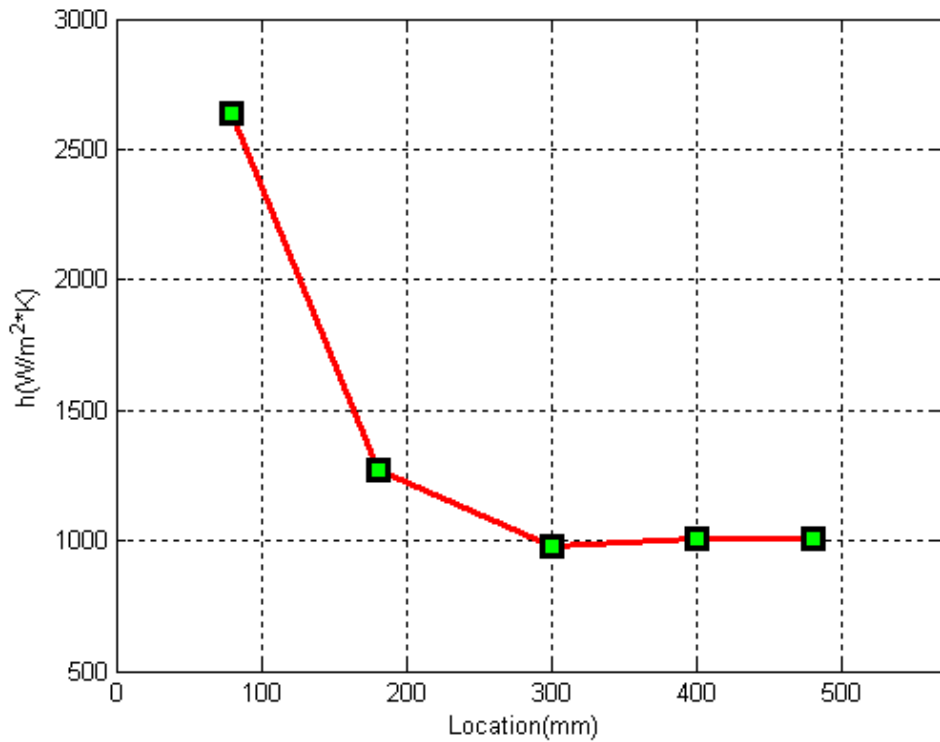


圖 3- 22 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=1690$ ，不同位置下的熱傳係數

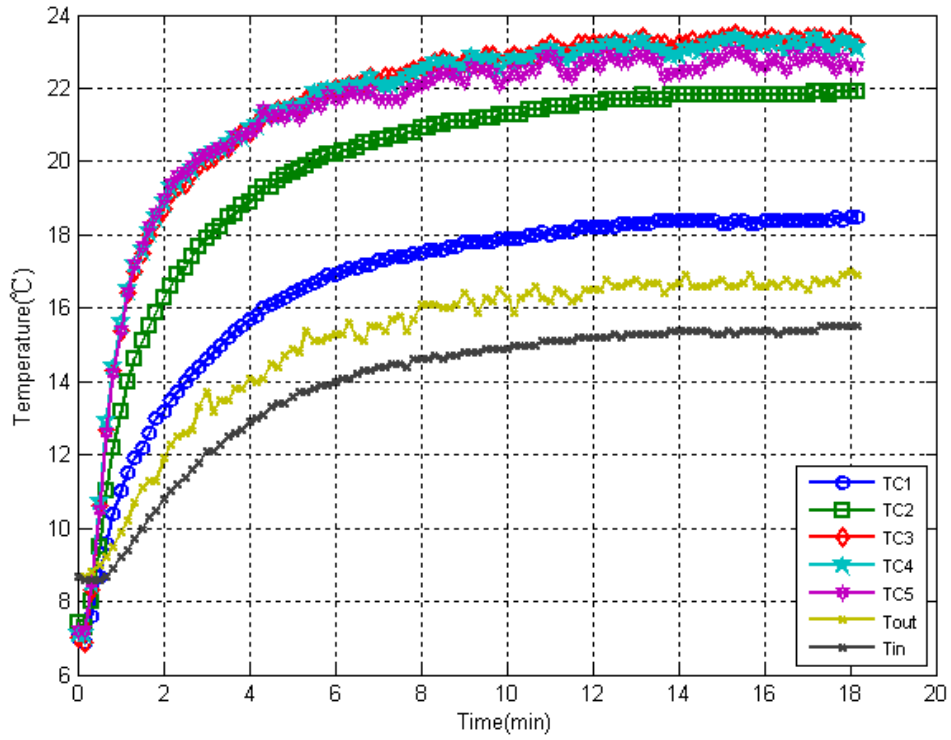


圖 3- 23 在  $Re=2028$ ，磁性流體( $\Phi=0.1$ )各點溫度與時間的變化圖

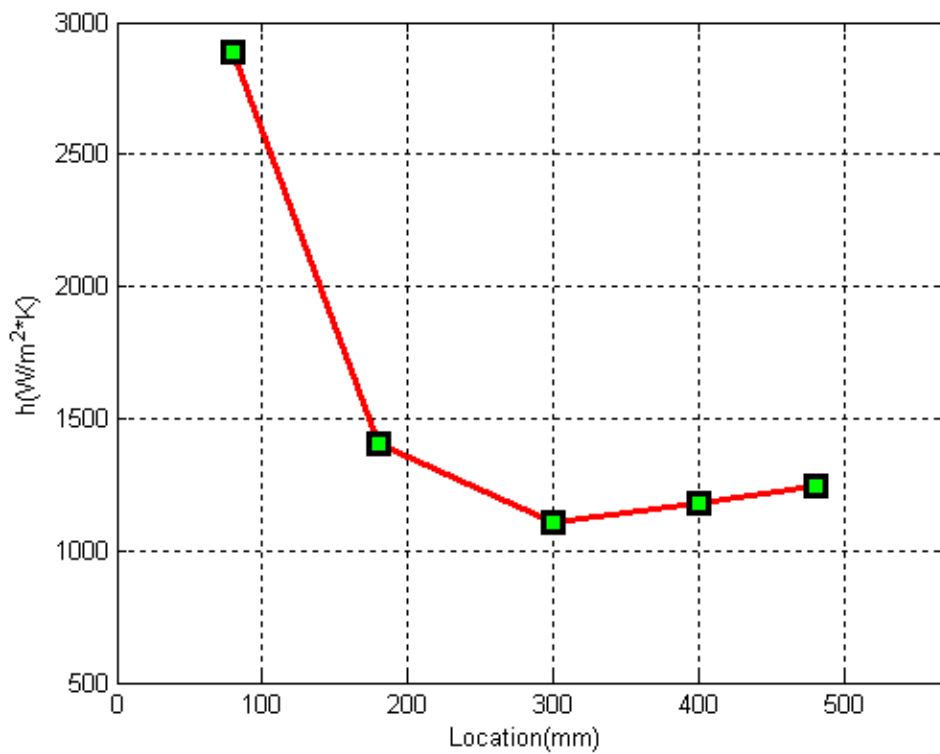


圖 3- 24 磁性流體( $\Phi=0.1$ )在  $Re=2028$ ，不同位置下的熱傳係數

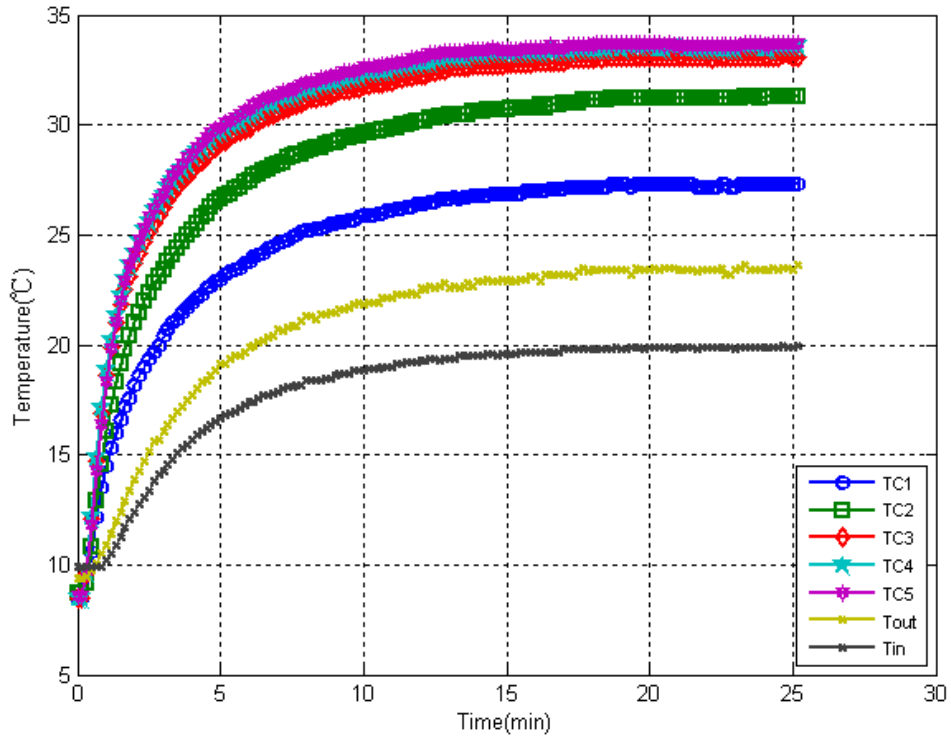


圖 3-25 在  $Re=525$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

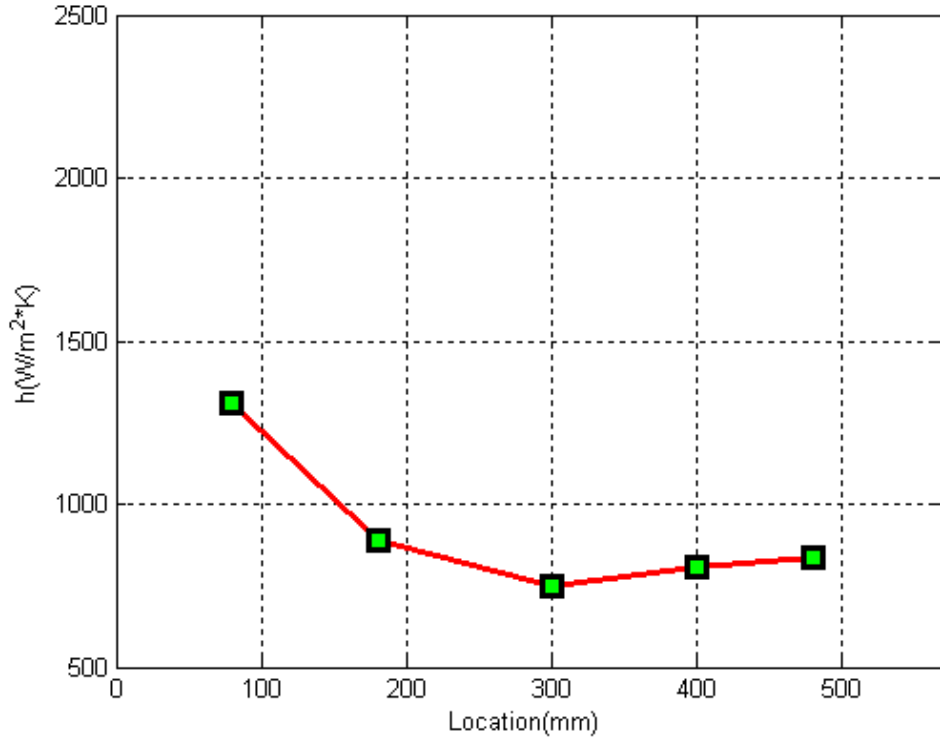


圖 3-26 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=525$ ，不同位置下的熱傳係數

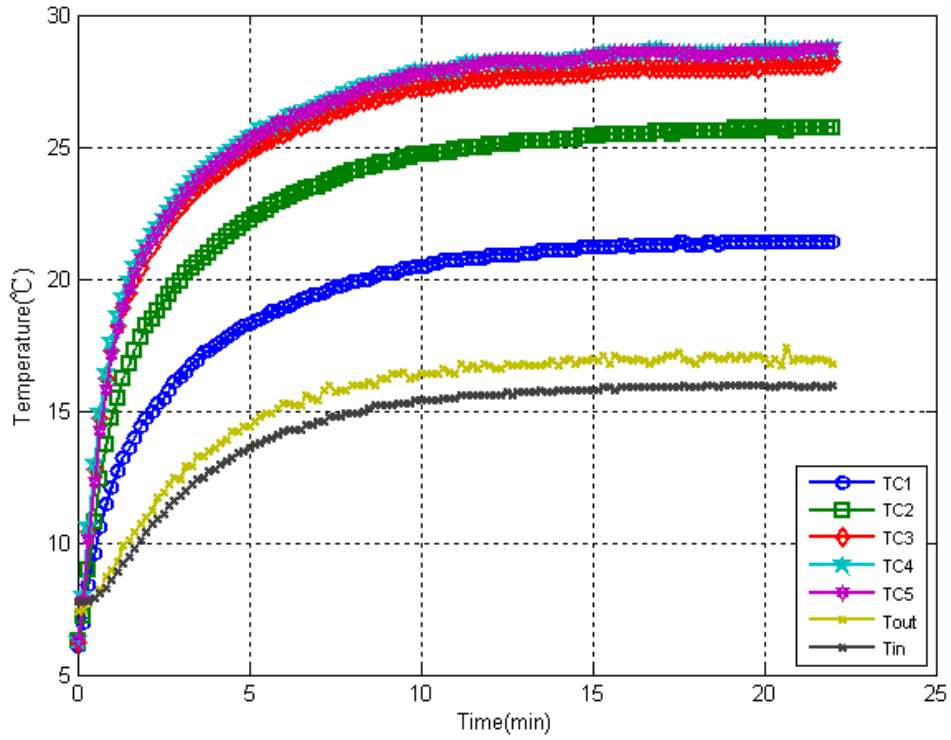


圖 3-27 在  $Re=743$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

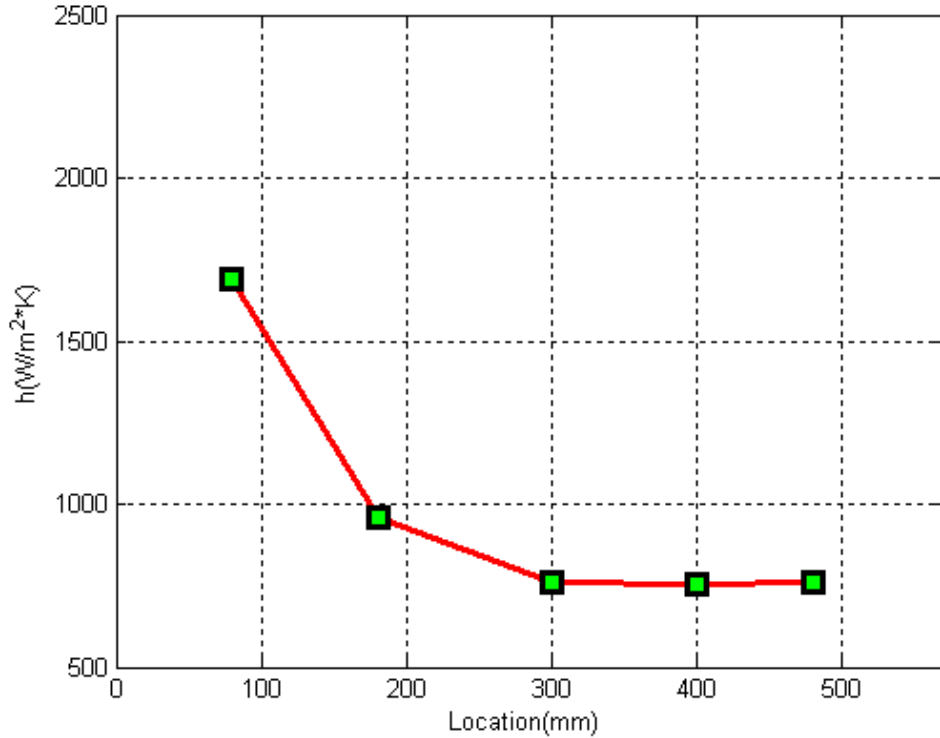


圖 3-28 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=743$ ，不同位置下的熱傳係數

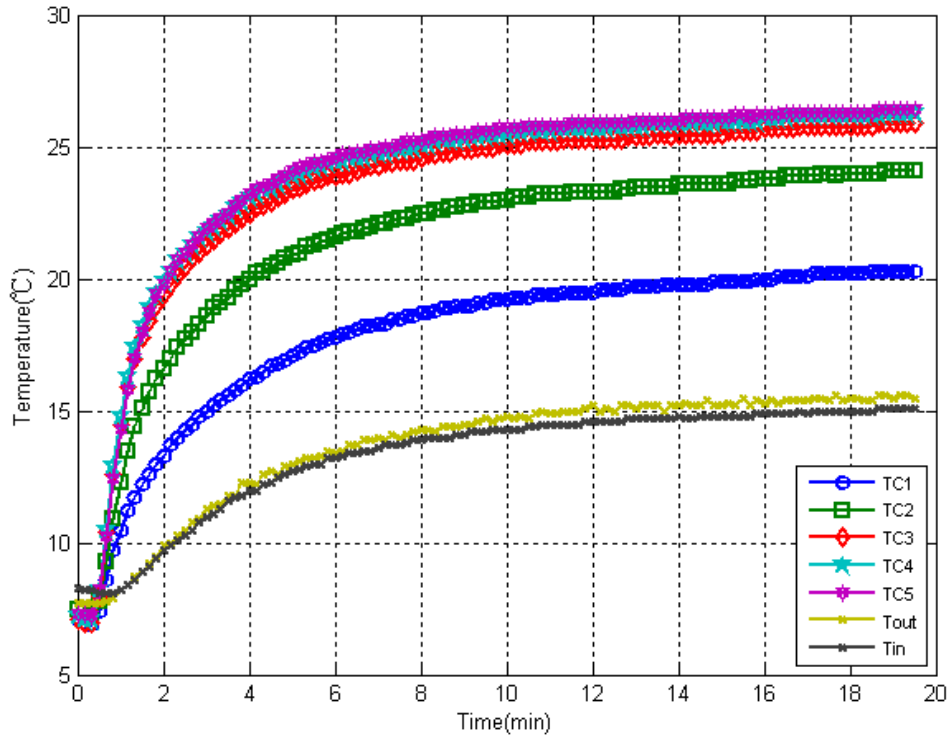


圖 3-29 在  $Re=969$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

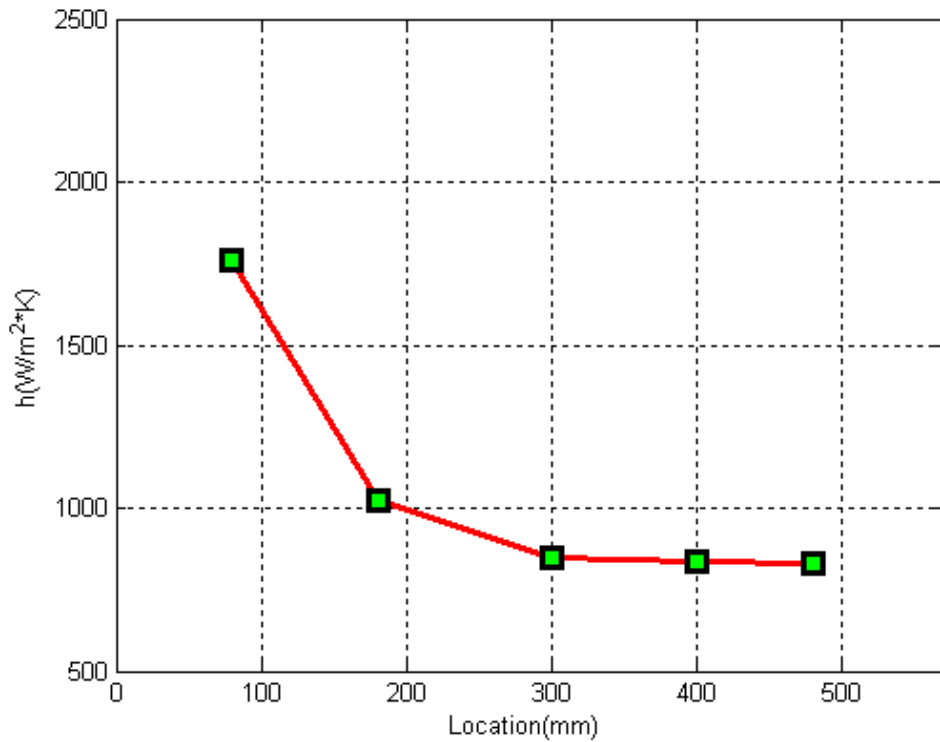


圖 3-30 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=969$ ，不同位置下的熱傳係數

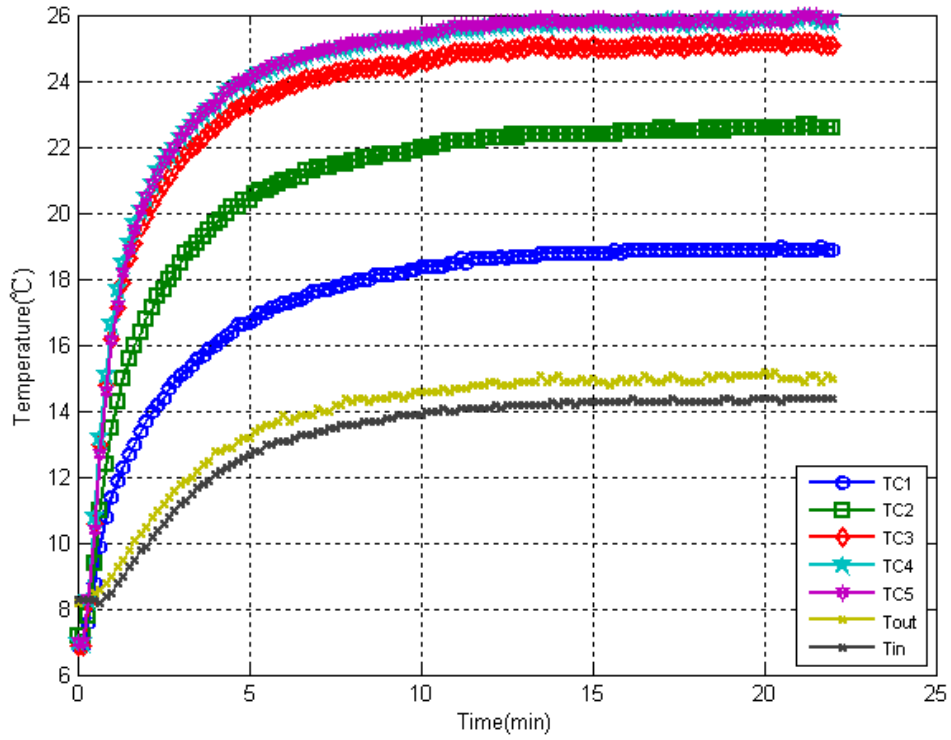


圖 3- 31 在  $Re=1292$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

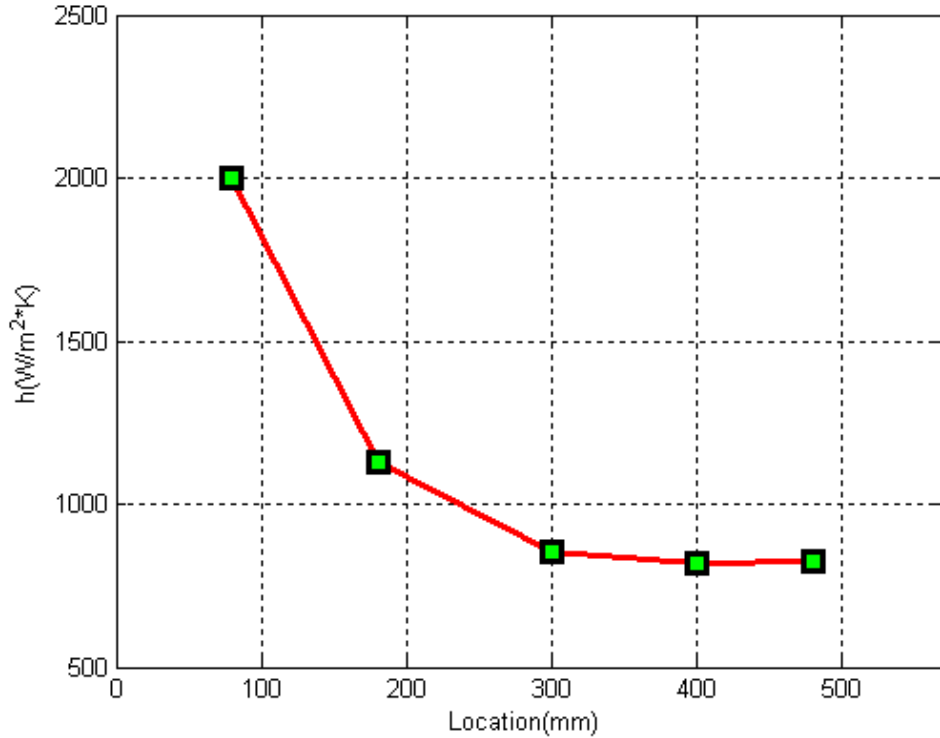


圖 3- 32 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=1292$ ，不同位置下的熱傳係數

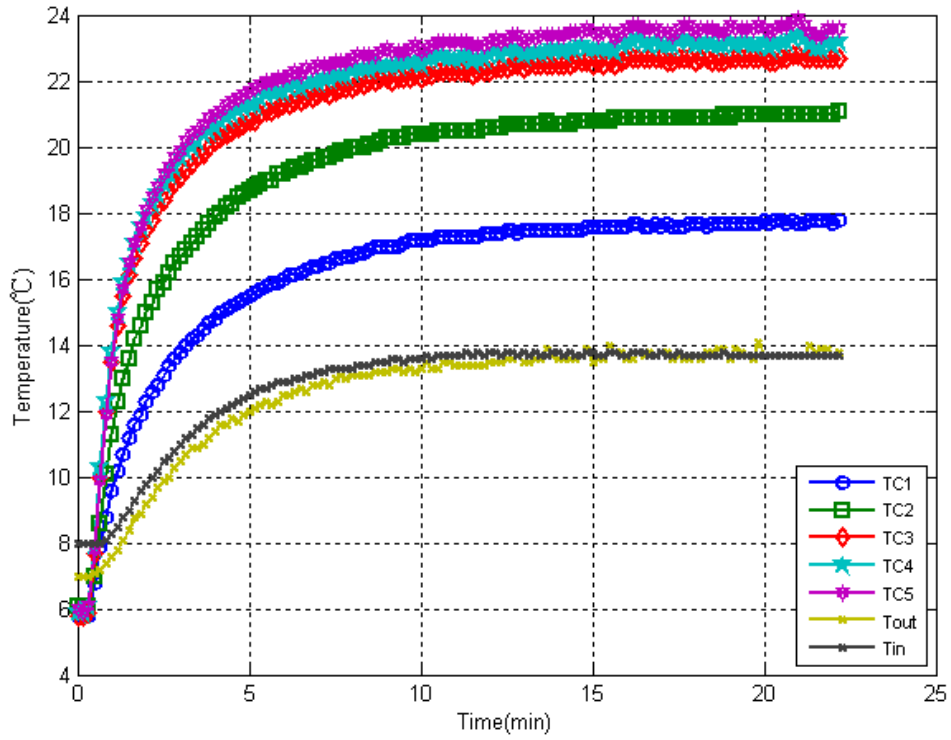


圖 3-33 在  $Re=1526$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

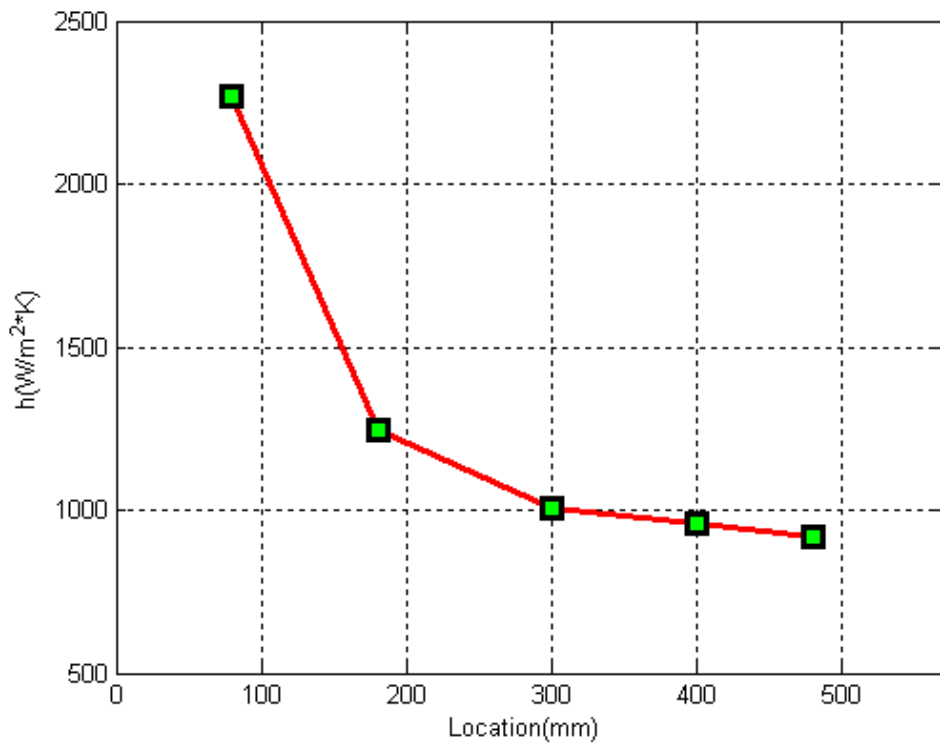


圖 3-34 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=1526$ ，不同位置下的熱傳係數



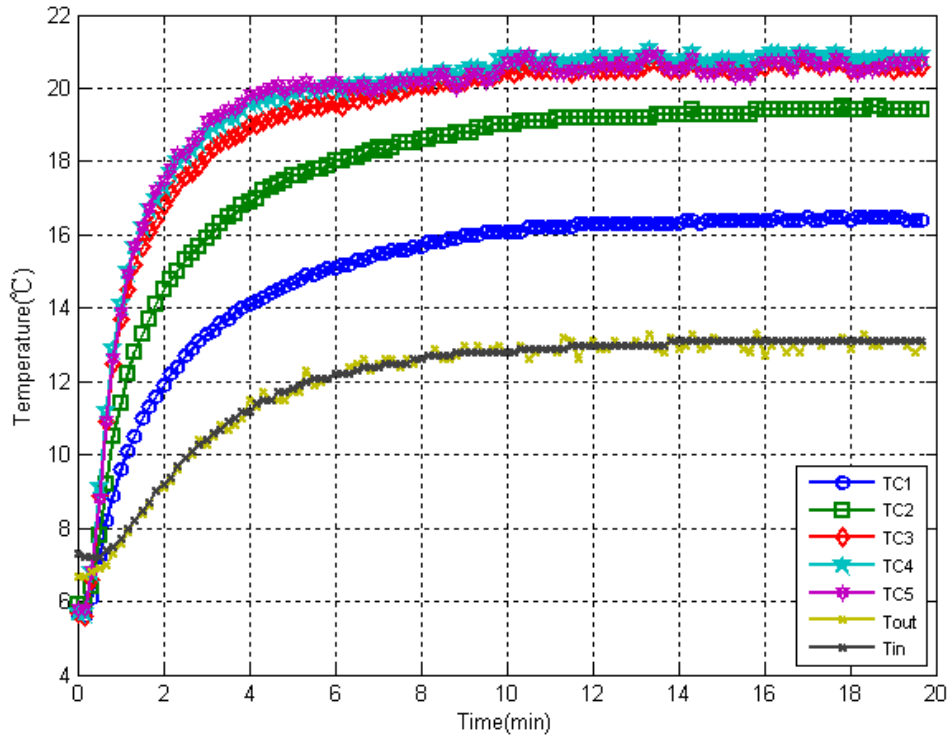


圖 3- 35 在  $Re=1780$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

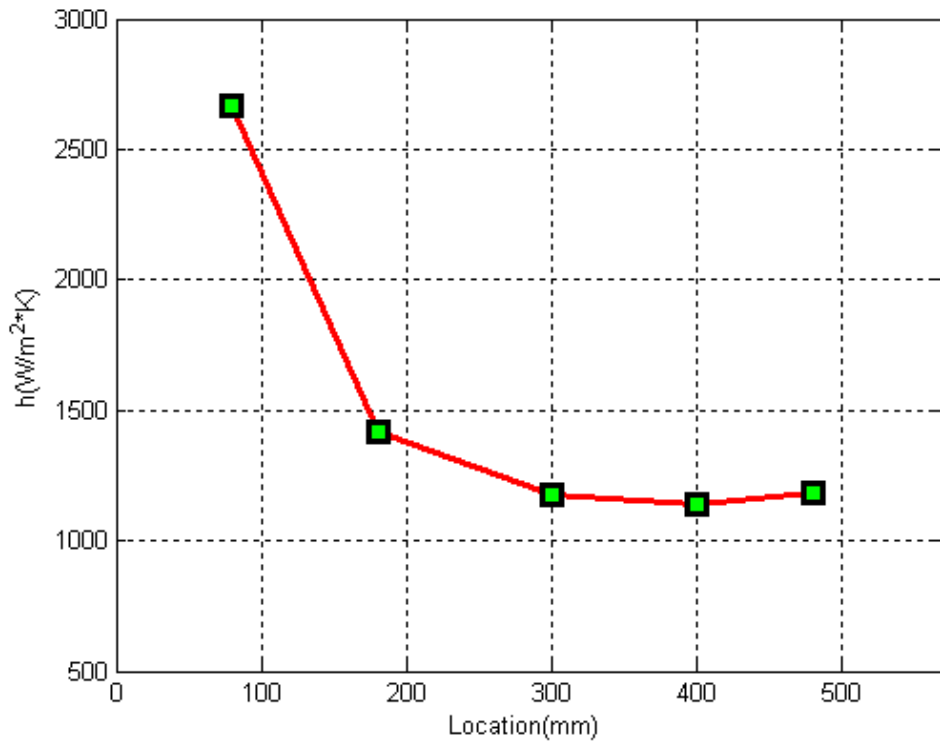


圖 3- 36 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=1780$ ，不同位置下的熱傳係數

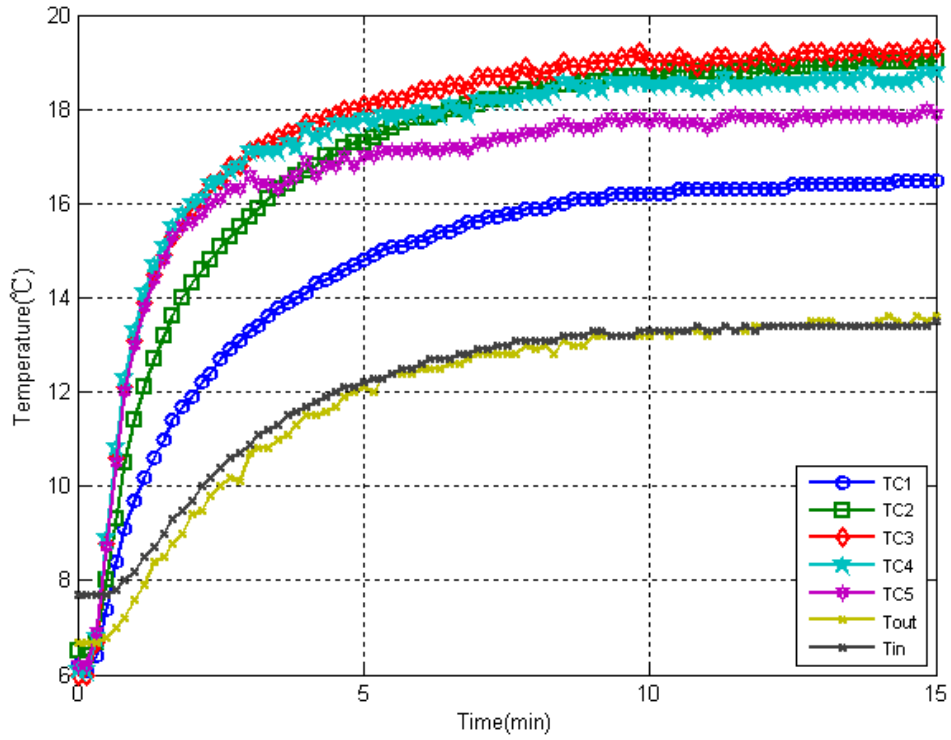


圖 3- 37 在  $Re=2035$ ，磁性流體( $\Phi=0.2$ )各點溫度與時間的變化圖

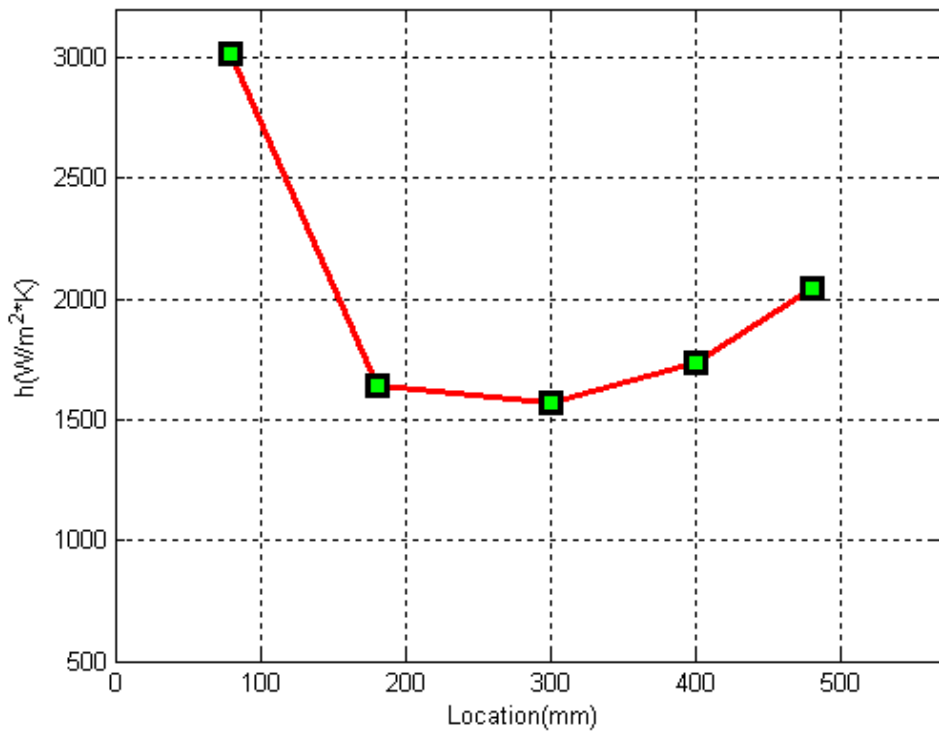


圖 3- 38 磁性流體( $\Phi=0.2$ )在  $Re=2035$ ，不同位置下的熱傳係數

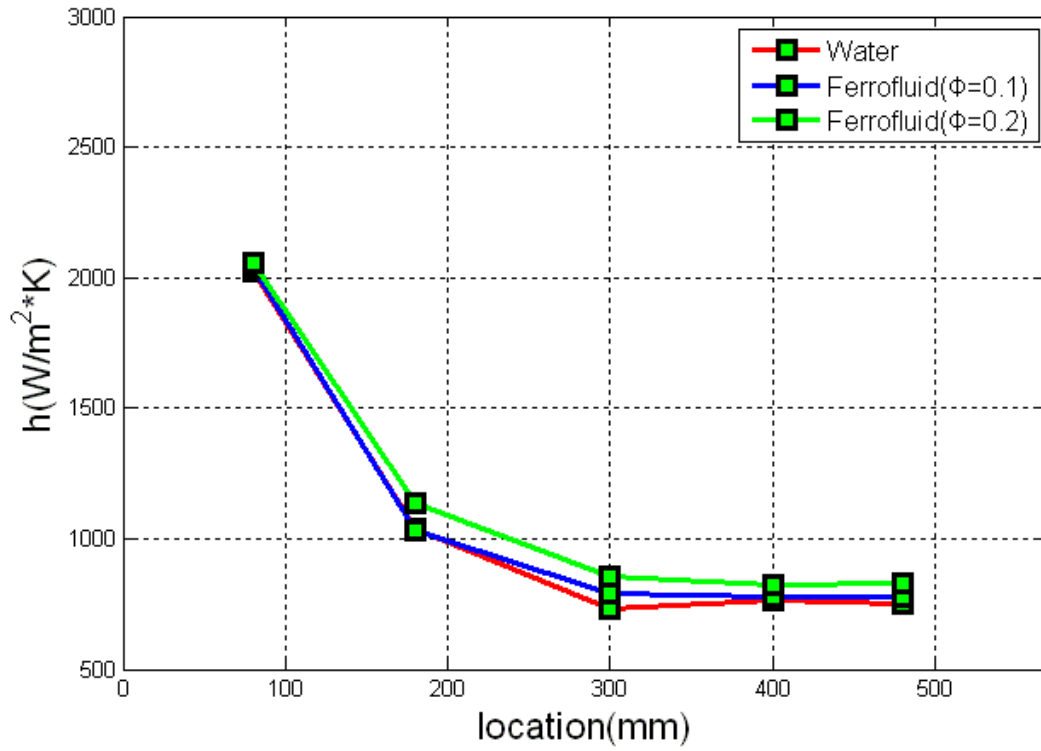


圖 3-39 當  $Re = 1350$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較

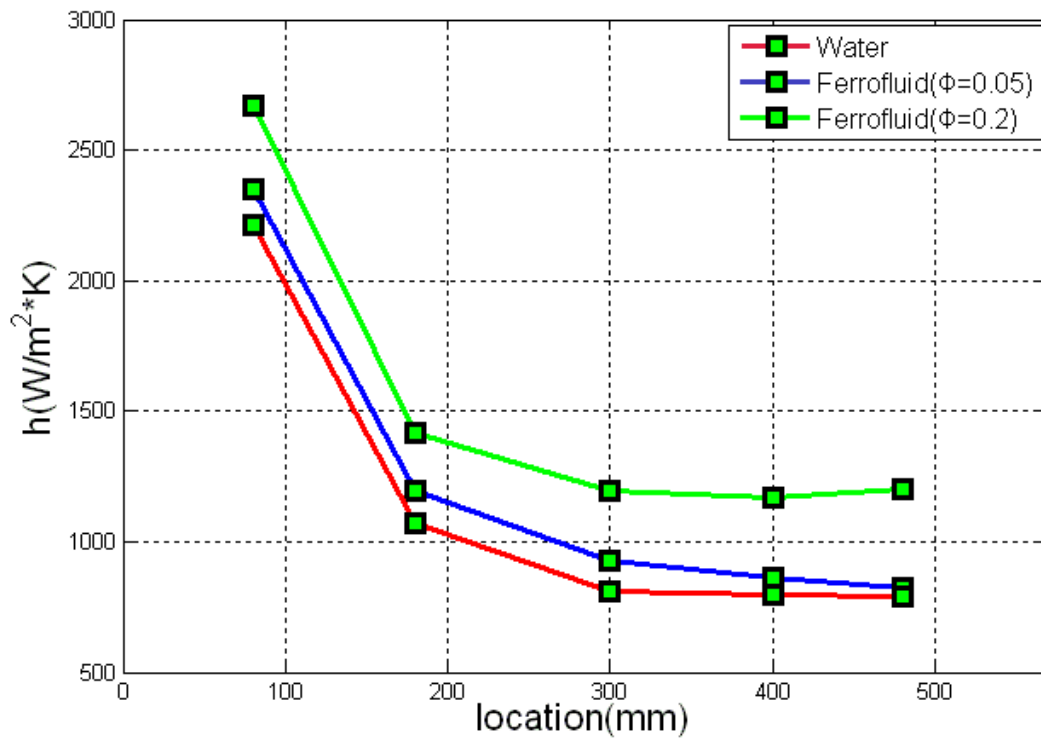


圖 3-40 當  $Re = 1850$ ，磁性流體不同體積分率的熱傳係數之比較

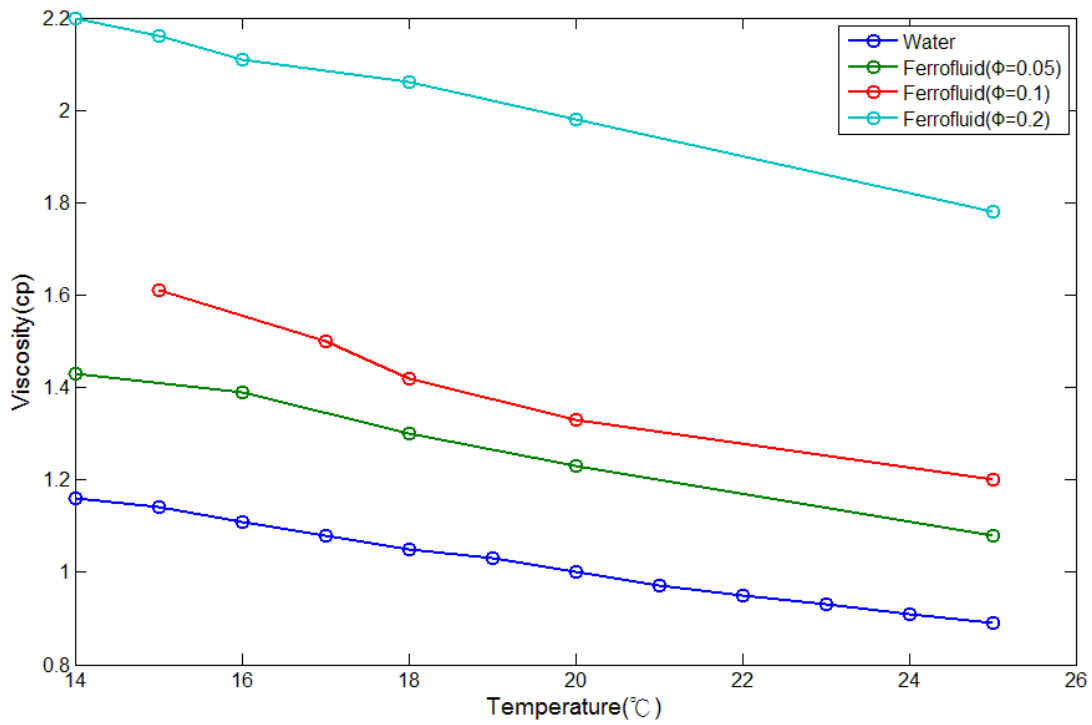


圖 3-41 溫度對黏滯係數的影響

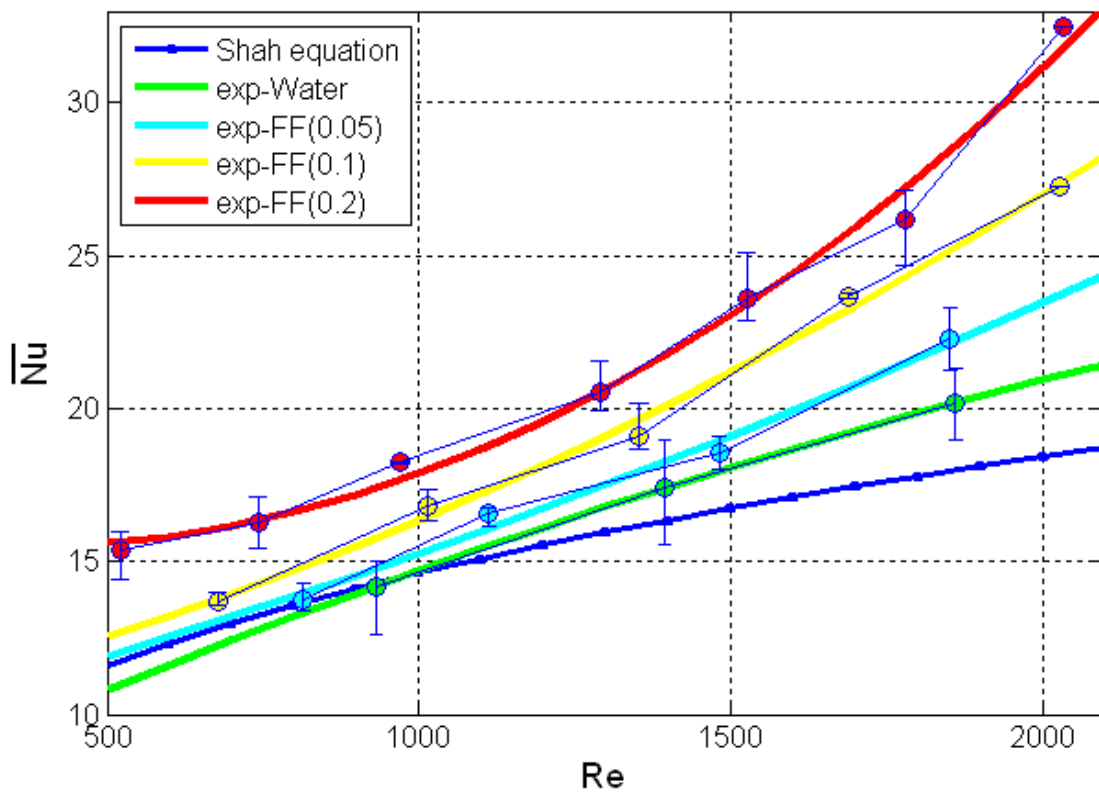


圖 3-42 與文獻中 Shah equation 做比較之磁性流體之平均 Nu 與 Re 的關係圖

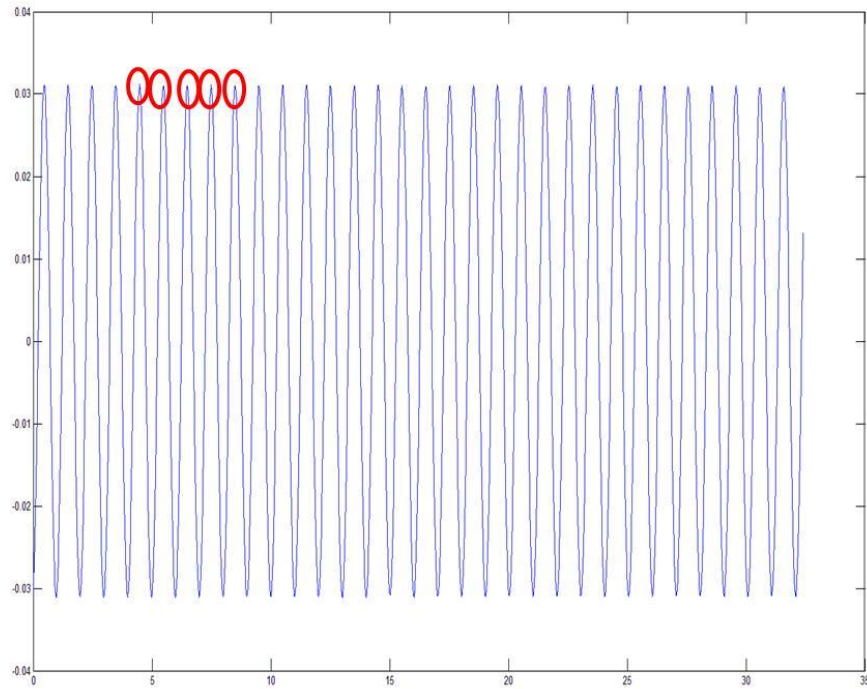


圖 3-43 擷取訊號平均最大電壓示意圖

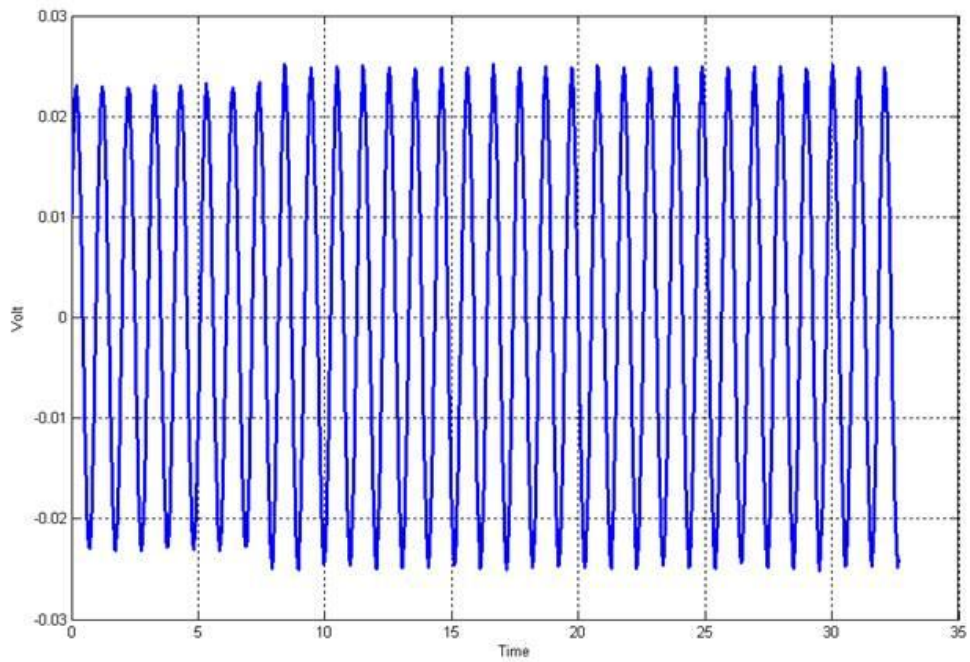


圖 3-44 APG830 在  $\Phi=0$  和  $\Phi=0.2$  的感應電壓之比較

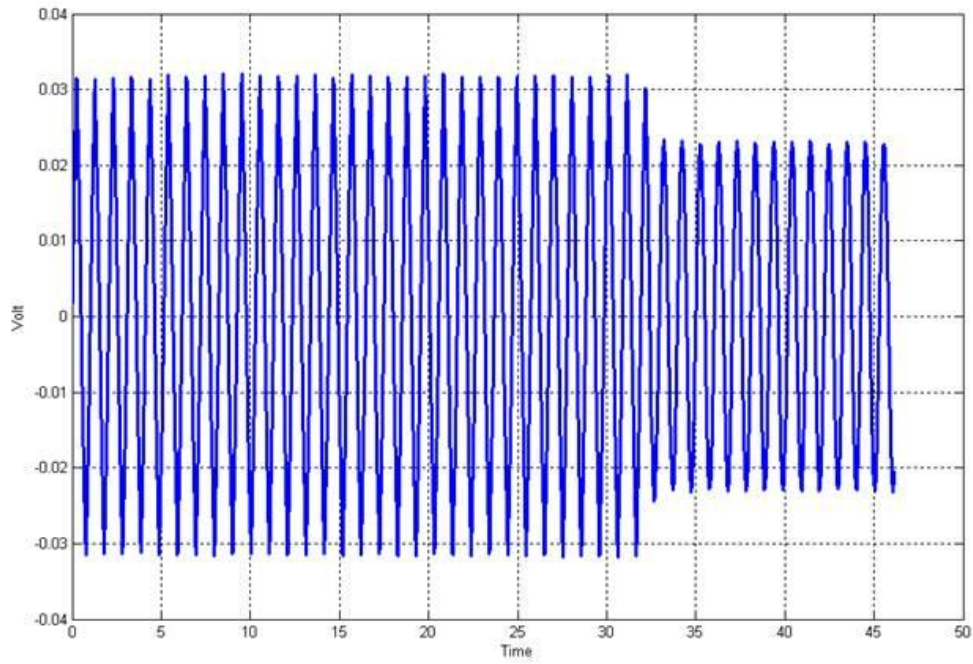


圖 3-45 APG830 在  $\Phi=1$  和  $\Phi=0$  的感應電壓之比較

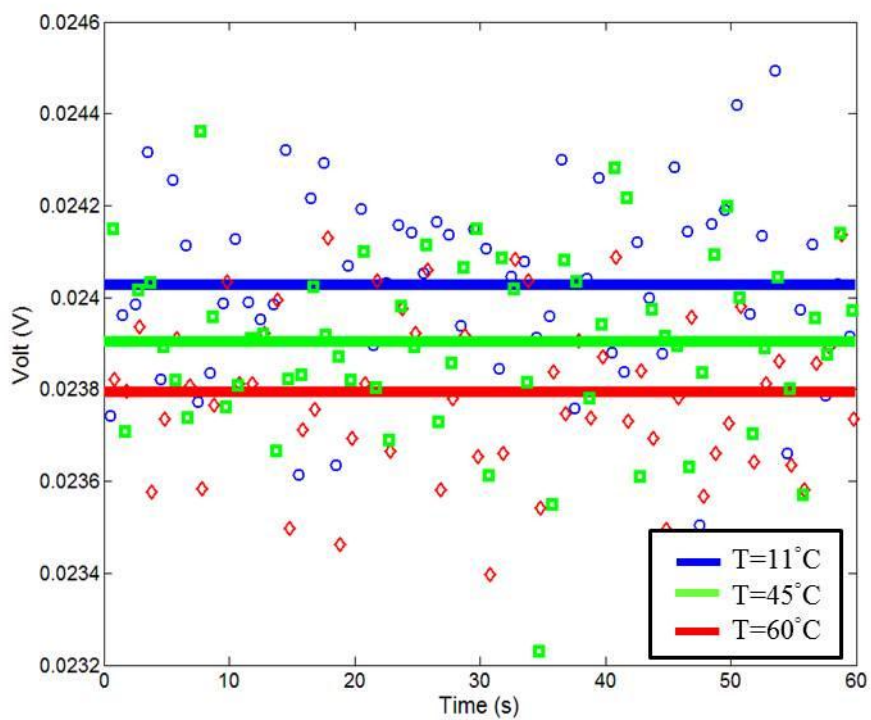


圖 3-46 磁性流體( $\Phi=0.1$ )不同溫度對感應電壓之影響

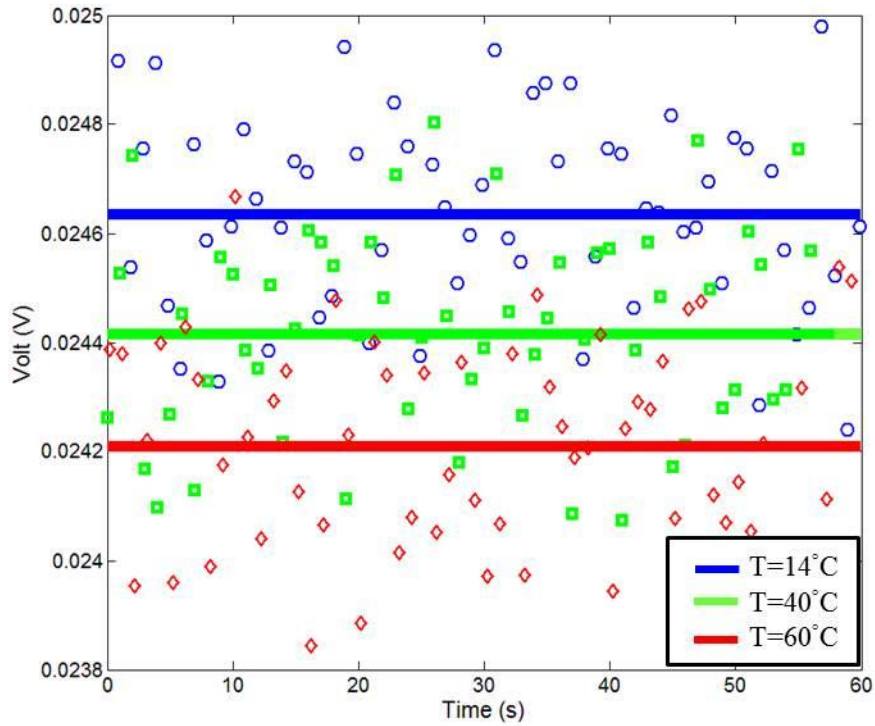


圖 3-47 磁性流體( $\Phi=0.2$ )不同溫度對感應電壓之影響

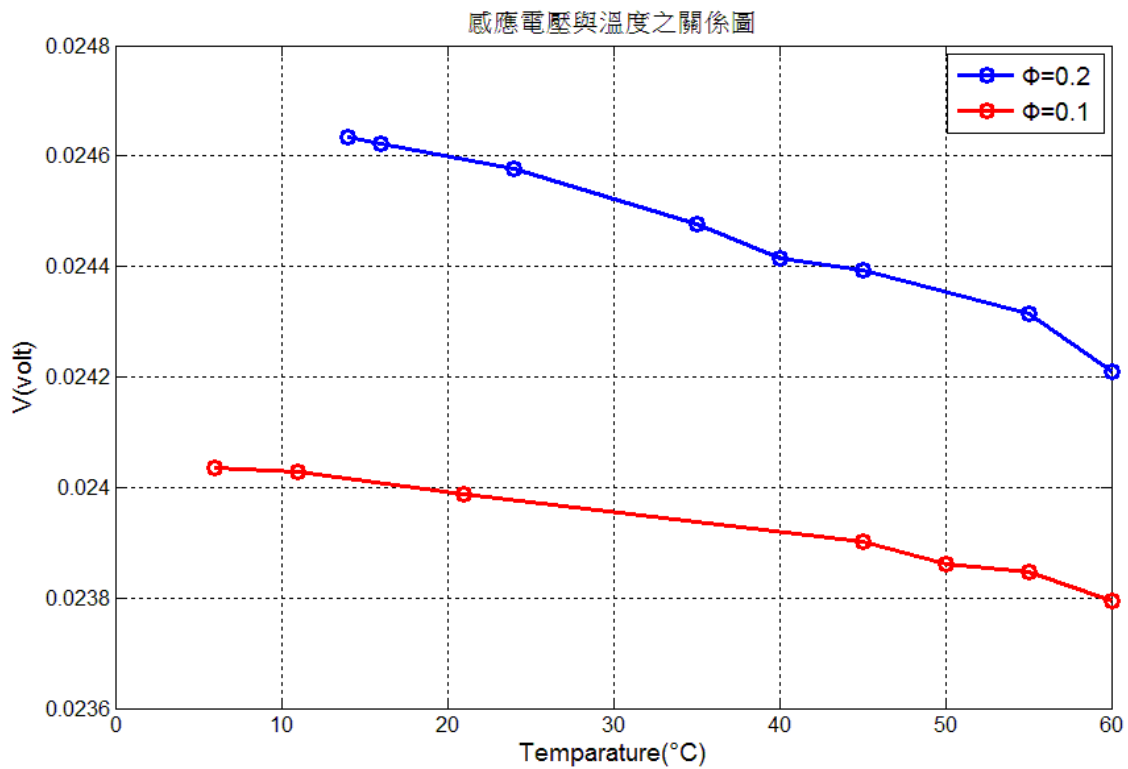


圖 3-48 不同體積分率下所量測的感應電壓與溫度之關係圖

## 第四章 結論

本實驗研究磁性流體之熱傳行為與磁性流體產生的感應電壓之擷取。在本文實驗首先主要探討磁性流體在不同的 Re 或體積分率下的熱傳行為，分別比較以雷諾數(Re)為變數和以體積分率為變數兩種形況下的熱傳係數；以及將各位置的 Nu 取平均，對不同體積分率下的平均 Nu 與 Re 作比較。最後，探討磁性流體產生的感應電壓之擷取，將不同溫度或不同體積分率的磁性流體使之通過線圈裝置，所造成的感應電壓大小之變化，再利用所擷取到的感應訊號進行分析與比較。

磁性流體在熱傳上的表現，與文獻中奈米流體之熱傳上的表現非常相近；在層流的情況下，增加磁性流體的體積分率對於對流熱傳係數有顯著的提升，以及磁性流體之熱傳係數會隨雷諾數的增加而提升。在相同的雷諾數下，提高磁性流體的體積分率亦會使流體的熱傳係數增加，此外，當提高 Re 時離熱端入口越近之熱傳係數的增加幅度最為明顯，而離入口端越遠熱傳係數增加的趨勢就越小；此外，本實驗試圖建立磁性流體的平均 Nu 與 Re 的關係並與文獻中 Shah equation 做比較，發現本實驗相當符合 Shah equation 經驗公式。

在感應訊號擷取的部分，磁通量密度會隨著磁性流體的體積分率增加而增加，感應電壓振幅大小隨磁性流體的體積及磁場改變，當改變磁性流體的體積分率，感應電壓的大小會有較大的變化，以本實驗量測之數據，體積分率( $\Phi=1$ )與體積分率( $\Phi=0$ )的感應電壓大小之比值為 1.4，此代表全為磁性流體( $\Phi=1$ )的感應電壓大小較全為基礎流體( $\Phi=0$ )的感應電壓大小增加約 40%，另外比較體積分率( $\Phi=0.2$ )較與體積分率( $\Phi=0$ )所產生的感應電壓大小也增加約 8%，可發現磁性流體的體積分率與感應電壓差成正比的關係，此結果與文獻中吻合。而以磁性流體的溫度為變數對感應電壓大小的關係中，可以發現雖然溫度也是影響感應電壓大小的參數之一，其影響卻是遠小於體積分率為變數的差異，但雖影響較



小，溫度增加仍然會使感應電壓下降，且在提升相同的溫度差，體積分率較大的磁性流體所產生的感應電壓下降量也會越大，磁性流體體積分率較小者所產生的感應電壓下降量也就越小，此結果與磁性流體的特性相當吻合。

本研究最後目的是希望結合磁性流體應用於熱傳方面與對應的感應電壓之量測，將磁性流體在熱傳中實際應用，並搭配線圈組裝置於流場流道外側，一方面希望利用磁場能對磁性流體產生磁性粒子間的串接排列進而增加磁性流體的對流熱傳強度，另一方面能藉由感應線圈量取感應電壓，判讀磁性流體在不同位置的溫度分布，以非侵入式的溫度量測取代熱電耦等侵入式的量測，這將有助於之後磁性液滴在流場實驗中之研究探討。



## 參 考 文 獻

- [1] J. C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism" ,Second Edition, Oxford university press, New York, p. 435,(1904).
- [2] R. L. Hamilton and O. K. Crosser, "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", Industrial & engineering chemistry fundamentals, vol. 1, pp. 187-191,( 1962).
- [3] Y. Xuan and Qiang Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids", International Journal of Heat and Fluid Flow 21 (2000) 58–64
- [4] S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nano-particles", ASME Fluids Engineering Division, vol. 231,pp. 99-105, (1995).
- [5] Y. Xuan and Qiang Li, "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", Int. J. Heat Fluid Flow, 1~21, pp. 58–64,(2003).
- [6] Tae-Keun Hong, Ho-Soon Yang, and C. J. Choi,"Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids",J. Appl. Phys. p97, 064311 (2005)
- [7] John Philip,P. D. Shima, and Baldev Raj,"Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures",Appl. Phys. Lett. p91, 203108 (2007)
- [8] Maryamalsadat Lajvardi, Jafar Moghimi-Rad , Iraj Hadi , Anwar Gavili,Taghi Dallali Isfahani,Fatemeh Zabihi,Jamshid Sabbaghzadeh, "Experimental in vestigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic fieldeffect," Journal of Magnetism and Magnetic Materials 322 (2010) 3508–3513
- [9] Qiang Li , Yimin Xuan, "Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field", Experimental Thermal and Fluid Science 33 (2009) 591–596
- [10] T. M. Kwon, M. S. Jhon and T. E Karis, “A device for measuring the concentration and dispersion quality of magnetic particle suspensions,” IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 41, 10-16(1992)
- [11] M. Zahn, “Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology,” Journal of Nanoparticle Vol. 3, 73–78(2001)
- [12] R. C. Nicklin, “Faraday’s law-Quantitative experiment,” American association of physics teachers, vol. 54, 422-428(1986)
- [13] L. T. Wood, R. M. Rottmann and R. Barrera, “Faraday’s law, Lenz’s law, and conservation of energy,” American Association of Physics Teachers, Vol. 72,376-380(2004)
- [14] H. Yamaguchi, S. Shuchi, M. Takemura and T. Kuwahara, “ Measurement of Void Fraction in Magnetic Fluid Using Electromagnetic Induction,” The fifth SME-KSME fluid engineering conference, NOV. 17-21(2002)
- [15] S. Shuchi, H. Yamaguchi and M. Takemura, “Measurement of Void Fraction in Magnetic Fluid Using Electromagnetic Induction,” Journal of Fluids Engineering, Vol. 125, 479 -486(2003)
- [16] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, “Void fraction measurement in magnetic fluid,” Journal of

Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 289, 403-406(2005)

[17] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, "Void fraction measurement in magnetic fluid," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 289, 403-406(2005)

[18] T. Kuwahara and H. Yamaguchi, "Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow using magnetic fluid," Journal of thermophysics and heat transfer ,

[19] T. Kuwahara , F. D. Vuyst and H. Yamaguchi, " Flow regime classification in air magnetic fluid two-phase flow," Journal of Physics, Vol. 20, 204141(2008)

[20] T. Kuwahara, F. D. Vuyst and H. Yamaguchi, "Bubble velocity measurement using magnetic fluid and electromagnetic induction," PHYSICS OF FLUIDS ,Vol. 21, 097101(2009)

[21] 吳啟鳴, "磁性流體電能轉換應用於流場量測之實驗研究", 國立交通大學機械工程學系 (2010)

[22] 黃國安, "磁性液滴電能轉換應用於流場量測之實驗研究", 國立交通大學機械工程學系 (2011)

[23] Dongsheng Wen, Yulong Ding, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 47, Issue 24, November (2004), Pages 5181–5188

