

科技部補助專題研究計畫成果報告

期末報告

微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC 102-2221-E-007-088-
執行期間：102 年 08 月 01 日至 103 年 07 月 31 日
執行單位：國立清華大學動力機械工程學系

計畫主持人：蔣小偉

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：鄭承祐
碩士班研究生-兼任助理人員：陳雲飛

處理方式：

1. 公開資訊：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2 年後可公開查詢
2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否
3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考：否

中 華 民 國 103 年 10 月 10 日

中文摘要：本研究乃是引進複循環(Combined Cycle)的設計概念，結合有機朗肯循環(ORC)，利用氣渦輪機(GT)運轉時排放高溫廢熱的特性，驅動 ORC 進行發電，目的為建立一微型有機朗肯與 9KW 氣渦輪機複循環系統。此系統主要利用 GT 發電系統中所產生的廢熱作為熱源，驅動有機朗肯循環之發電系統，進而使 GT 發電系統的廢熱能夠進行二次的應用，以提供額外的發電能力，完成複循環發電系統，並有效提高整體效率。

研究過程中，首先將會針對 GT 發電系統架設一實驗量測平台，並量測其不同操作點、轉速及發電量下之排氣溫度及壓力等特性，並建立 GT 性能曲線及資料庫。接著針對其廢熱回收特性進行 ORC 之設計及模型建立，模擬不同有機工作流體特性和蒸發溫度在此系統下之表現，並探討熱交換效率對系統之影響，建立符合 GT 系統的 ORC 複循環模型。經過分析計算系統發電量與效率後，最終將完成有機朗肯與氣渦輪機複循環之性能分析系統，以評估 ORC 應用在微型氣渦輪機廢熱回收之可行性。

中文關鍵詞：微型氣渦輪機、有機朗肯複循環、廢熱回收

英文摘要：This proposed combined cycle starts with our existing 9 kW microturbine to be combined with a proposed micro ORC cycle. Basically, we will take the exhaust heat of 500~600°C from the microturbine to be input to the micro ORC cycle, so that we can take advantage of the waste heat from the turbine to the ORC cycle to generate additional power. The expected thermal efficiency can be increased from the current 15% to about 25%.

During the proposed process, we will start with the microturbine test stand so we can measure the exhaust temperature, flow rates, and pressure, under different operating conditions. With this in mind we can establish the baseline data to be used for choosing the compatible ORC system. Then we will start building the desired micro ORC model to complete our combined cycle design including ORC working fluid and vaporize temperature selection. After conducting the heat exchanger simulate testing with microturbine in place, we can establish a complete ORC/GT combined cycle design system and be able to demonstrate the expected efficiency target.

英文關鍵詞： microturbine、ORC/GT、combined cycle

科技部補助專題研究計畫成果報告

(☐期中進度報告/☒期末報告)

微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究

計畫類別：☒個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫編號：NSC 102-222 1-E-007-088

執行期間：2013 年 08 月 01 日至 2014 年 07 月 31 日

執行機構及系所：國立清華大學動力機械工程學系

計畫主持人：蔣小偉 教授

共同主持人：無

計畫參與人員：鄭承祐、陳雲飛

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 0 份：

☐執行國際合作與移地研究心得報告

☐出席國際學術會議心得報告

期末報告處理方式：

1. 公開方式：

☐非列管計畫亦不具下列情形，立即公開查詢

☐涉及專利或其他智慧財產權，☐一年☒二年後可公開查詢

2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：☒否 ☐是

3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考 ☒否 ☐是，_____（請列舉提供之單位；本部不經審議，依勾選逕予轉送）

中 華 民 國 103 年 3 月 24 日

目錄

摘要	III
一、前言及研究目的	2
二、文獻回顧	2
三、研究方法	5
3-1. 微型燃氣渦輪實驗量測.....	6
3-2. 有機朗肯循環	7
四、研究結果與討論	9
4-1. 微型渦輪機發電系統	9
4-2. 有機朗肯循環	11
4-3. 複循環系統	17
五、研究結果與討論	25
參考文獻.....	26
科技部補助專題研究計畫成果報告自評表	<u>28</u>
科技部補助計畫衍生研發成果推廣資料表	<u>29</u>

摘要

本研究乃是引進複循環(Combined Cycle)的設計概念，結合有機朗肯循環(ORC)，利用氣渦輪機(GT)運轉時排放高溫廢熱的特性，驅動 ORC 進行發電，目的為建立一微型有機朗肯與 9KW 氣渦輪機複循環系統。此系統主要利用 GT 發電系統中所產生的廢熱作為熱源，驅動有機朗肯循環之發電系統，進而使 GT 發電系統的廢熱能夠進行二次的應用，以提供額外的發電能力，完成複循環發電系統，並有效提高整體效率。

研究過程中，首先將會針對 GT 發電系統架設一實驗量測平台，並量測其在不同操作點、轉速及發電量下之排氣溫度及壓力等特性，並建立 GT 性能曲線及資料庫。接著針對其廢熱回收特性進行 ORC 之設計及模型建立，模擬不同有機工作流體特性和蒸發溫度在此系統下之表現，並探討熱交換效率對系統之影響，建立符合 GT 系統的 ORC 複循環模型。經過分析計算系統發電量與效率後，最終將完成有機朗肯與氣渦輪機複循環之性能分析系統，以評估 ORC 應用在微型氣渦輪機廢熱回收之可行性。

關鍵字:微型氣渦輪機、有機朗肯複循環、廢熱回收

Abstract

This proposed combined cycle starts with our existing 9 kW microturbine to be combined with a proposed micro ORC cycle. Basically, we will take the exhaust heat of 500~600°C from the microturbine to be input to the micro ORC cycle, so that we can take advantage of the waste heat from the turbine to the ORC cycle to generate additional power. The expected thermal efficiency can be increased from the current 15% to about 25%.

During the proposed process, we will start with the microturbine test stand so we can measure the exhaust temperature, flow rates, and pressure, under different operating conditions. With this in mind we can establish the baseline data to be used for choosing the compatible ORC system. Then we will start building the desired micro ORC model to complete our combined cycle design including ORC working fluid and vaporize temperature selection. After conducting the heat exchanger simulate testing with microturbine in place, we can establish a complete ORC/GT combined cycle design system and be able to demonstrate the expected efficiency target.

Keywords: microturbine、ORC/GT、combined cycle

一、前言及研究目的

現今大規模、高效率的發電技術正面臨該如何兼顧能源枯竭及環境保護兩大議題。近年由於全球石化能源存量開始枯竭，造成能源價格飆漲，台灣 98 % 的能源必須從國外進口，加上《京都議定書》於 2005 年 2 月正式生效，及 2009 年 12 月丹麥哥本哈根會議之減碳協議，節省發電能源，提高發電效率，降低二氧化碳排放，成為現今能源領域的主要議題。

目前能源市場所面臨的新挑戰即為：在石化能源枯竭以前開發下世代發電技術。根據美國能源部能源計畫，新一代發電技術必須符合兩項特點：一、新的能量轉換方式，排除受爭議的核能發電，目前開發中的能源如太陽能、風力、地熱、潮汐等發電方式在氣候與地理上均受到限制，使其發電效率無法提升至符合大規模經濟效益；二、相較現存的發電技術必須具有更高優勢或潛力，如分散發電、高容量、高安全性、低 NOX 與溫室氣體排放、低碳污染、能源可再生性等特點。因此，具備符合以上兩項特點，以結合微型渦輪發電系統與有機朗肯循環為研究特色，將廢熱回收再次利用的觀點頗具潛力成為下世代的新能源發電技術。

本研究目的是結合微型氣渦輪發電機(GT)與有機朗肯循環(ORC)之複循環，首先將使用渦輪機模擬軟體 GasTurb 模擬微型渦輪發電機的性能，並且建立一實驗平台量測微型渦輪發電機於不同操作點下所排放廢氣之特性(排氣溫度、流速及壓力)以相互驗證，之後建立出 GT 之性能資料庫以利後續分析研究。

接著針對 GT 廢熱回收特性進行 ORC 之程式模擬及模型建立，模擬不同有機工作流體特性、蒸發溫度及熱傳工作流體在 GT 不同轉速下的表現，得出 ORC 最佳化之設計點，並藉由實驗量測 GT 廢熱回收系統之實際回收率，再經由 ORC 模擬計算，建立一符合 GT 系統之 ORC 模型，最終將完成微型有機朗肯與氣渦輪機複循環之性能分析與研究。

二、文獻回顧

➤ 微型渦輪發電系統

微型氣渦輪機的能源密度高，可使用多種液體或氣體做為燃料，McDonald[01]即於 1996 年提出若將氣渦輪引擎之餘熱回收，其效率可提升至 50% 以上。

1996 年 Bathie [02] 提出氣渦輪引擎在不具熱回收系統下其整體熱效率與引擎輸出比功率、渦輪機入口溫度及壓縮比的關係，提高壓縮比可有效提高熱效率；當引擎在壓縮機壓縮比設計點上，引擎比功率隨渦輪機入口溫度升高而增加。

Bathie 對於加了熱回收系統的氣渦輪引擎亦有詳細介紹，其亦提及不具熱回收系統與加了熱回收系統後之氣渦輪引擎在引擎熱效率表現上之優劣，在壓縮比為 4 時，若熱回收效率達 80% 之氣渦輪引擎其熱效率大概是不加熱回收系統之氣渦輪引擎的兩倍，然而當高壓縮比（大於 16）時，熱回收系統對於熱效率的提升則較不顯著。因此，當欲利用熱回收系統提高氣渦輪引擎之熱效率時，其壓縮機之壓縮比勢必不高且存在一最佳值，以達到引擎之最佳性能設計點。

2000 年 Rodger [03] 設計了低功率 5~25kW 之微型氣渦輪發電機，熱效率可達到 22.5~27%。提出各重要組件之設計考慮要素、最新科技、尚待突破之困難與經濟考量，並指出不同功率之發電機存在最佳壓縮比與軸轉速曲線。而最符合空間與經濟考量的發電機設計，乃是將同軸之永磁高速發電機與壓縮機、渦輪機置於一側，另一側則是包覆式的固定式熱回收器搭配環狀燃燒室。

2008 年 Capstone 公司開發了 C65 渦輪發電系統[04]，因其軸承系統配置於壓縮機與渦輪機之間，且又採用氣浮軸承，所以不會有軸承過熱之問題，該渦輪發電系統之發電量可達 65 KW，最高輸出電流為 100 A，其特點尚包括：發電機配置於壓縮機端，一方面遠離渦輪機，一方面也利用壓縮機進氣來冷卻發電機。

2009 年本實驗室開始進行微型渦輪發電機的開發[05]。系統之動力源採用以軸功形式輸出之 HP5 渦輪軸(turbo shaft)引擎，整合成一套發電系統。系統成功建立後，進行發電量之測試。對系統做無固定參數測試、固定引擎轉速測試與固定發電機輸出電壓測試。測試結果其系統已成功發至 1,000 W。(圖 1-2)

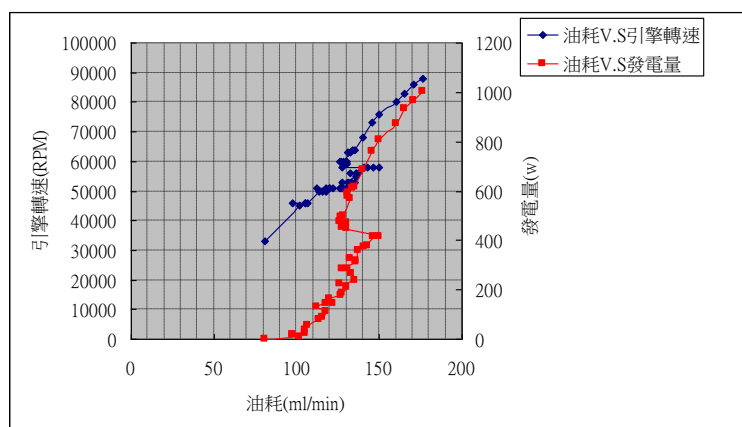


圖 1-1 發電量測試結果[05]

2012 年本實驗室已累積多年微型氣渦輪之研究發展經驗，並成功實驗出 9.3kW 微型氣渦輪發電系統發電量[06]，其研究採用 JETCAT 公司之 SPT5 渦輪引擎做為動力核心，搭配 LMT 公司生產之 3060 發電機組進行實驗量測，整體系統之發電功率與歷年研究之比較如圖 1-2 所示，充分展現本實驗室對於微型渦輪發電系統之研發能量。

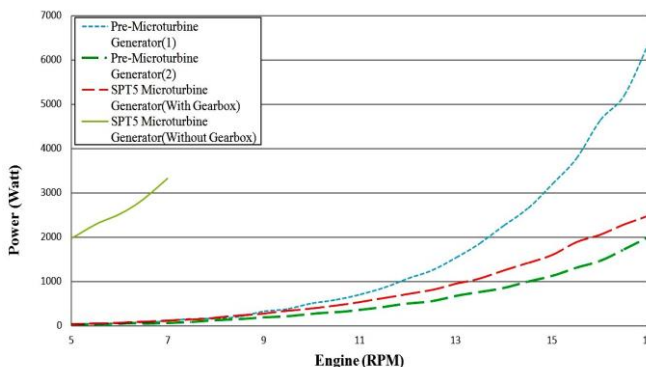


圖 1-2 發電功率測量結果比較[06]

➤ 有機朗肯與複循環循環

Mokhtar、Hassan、Srikar 與 Luc[07]針對微型渦輪機與朗肯循環結合的系統做了初步的結構的設計和材料的選擇，首先根據不同的需求運作目標和對應的熱力循環作分類，接著把主要目標的需求和限制運作條件(極限壓力、溫度梯度和轉速)、形狀、特徵尺寸來進行定義。以簡單的模擬來條列可行的材料。這些分析推導出可行的材料和幾何，並且量化然後權衡最後的表現和可靠度，最後對於設備和材料的細節設計還要考慮到生產力和是否需要潛在的額外加工等。

Maogang、Xinxin 與 Ke 等人 [08]內針對內燃機與 ORC 系統結合之複循環作能源的分析，研究指出隨著轉速及負載的增加，冷卻水以及潤滑劑所佔的耗能比率會下降，而排出的廢氣所佔的能源比例卻會上升，在此情形下其所作的有效功僅佔總耗能約三分之一；此外，在轉速高過一定值後(約 5000 RPM)廢氣的耗能更會超過所作的有效功，且相對於其他兩者，廢氣熱源有最佳的 Thermal quality，在高負載的情形下的熱回收效率最佳。得知如何有效的利用廢氣的能量將是提高整體效率的重要關鍵。

Basim [09]中提到在微型渦輪機(GT)結合有機朗肯循環(ORC)之複合循環中使用 ORC-245fa 作為有機朗肯循環之冷媒，在 ORC 的效率為 10%以及 EUF 為 38%下可增加大約 20%的輸出功。且發現一現象導致在蒸發器中可用性大為降低，此現象的起因為冷媒由液態轉變為過熱氣。

Pedro 與 Rogelio 在[10]中使用 cpastone 生產的 30~200kw 微型渦輪發電機組結合 ORC 作為廢熱回收裝置，在冷媒的選擇方面 R113 表現最佳，最差的為 R236fa。而整體增加的效率在 20~30%之間，結果顯示發電量越小之渦輪發電機組結合 ORC 所能提升的整體效率幅度越高，但越大型的微型渦輪機結合 ORC 後其整體效率依然較高。

工研院開發出 10 瓩 ORC 發電機組[12]，實驗設定熱源溫度於 95~120℃、冷源溫度 28~35℃，選用 R245fa 為工作流體，以螺桿膨脹機做為 ORC 迴路的做功元件，開發 10 瓩發電機組，其動力系統關鍵元件有昇壓泵浦、板式蒸發器、注油式雙螺桿膨脹機、油汽分離器、殼管式冷凝器等，發電機則採用感應式發電機，電力直接併網。本 ORC 機組為國內首次成功研發機組，且自製率百分之百。機組性能測試時，ORC 蒸發溫度 93.5℃、冷凝溫度 43.5℃，發電量 10.6 瓩、發電效率 6.52%，與系統設計點理論值誤差範圍在 3%以內，驗證設計成果。

洪祖全[14]設計並建立一個有機朗肯循環(Organic Rankine Cycle, ORC)系統之迴路，進行 ORC 系統的理論與實驗整合，針對使用於低焓熱源循環系統較具潛力的冷媒(如:R141b、R134a、R245fa 等)，進行熱效率與不可逆性數值分析比較與討論。

工研院以及交通大學[15]共同發表利用一 10kW 有機朗肯循環發電機組，以實驗方法探討在不同的熱水供熱條件下，工作流體 R245fa 在板式熱交換器內蒸發過程(包含預熱、蒸發、過熱三個區域)的熱傳特性。應用於 ORC 系統中，當 R245fa 流量增加，除了蒸發器熱傳量提升外，R245fa 壓力與蒸發溫度亦隨之上升，因此 ORC 機組之發電量亦攀升。蒸發過程的過熱區域面積佔比小，故欲提升 ORC 中板式蒸發器的總熱傳率應從 R245fa 側預熱區域的熱傳增益著手。

Sylvain Quoilin 的文獻中，Sylvain Quoilin[16]等人將工作流體的性質、參數和作功元件的設計參數、工作點作計算和整理(圖 1-1)，對於進行有機朗肯循環分析模擬是非常有用的數據。國外也有很多研究單位針對工作流體做分析和數值模擬，找出其工作流體適合的應用端。

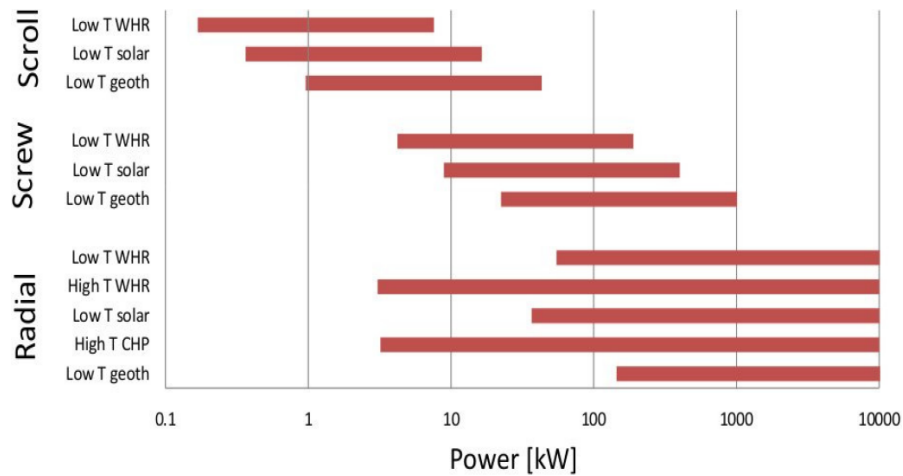


圖 1-3 各種作功元件可適用範圍[16]

三、研究方法

本微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環之研究主要可分為兩大部分:(1)微型渦輪機實驗量測與(2)有機朗肯循環模擬，其方法結構如下圖(4-1)所示。利用本實驗室開發之微型渦輪機量測其噴嘴出口氣體性質(溫度、流量)，繪出渦輪之轉速以及廢熱曲線圖，並利用微型渦輪機發電系統產生之廢熱作為回收熱源，應用在有機朗肯循環上進行模擬，以提高整體複循環之輸出和效率。

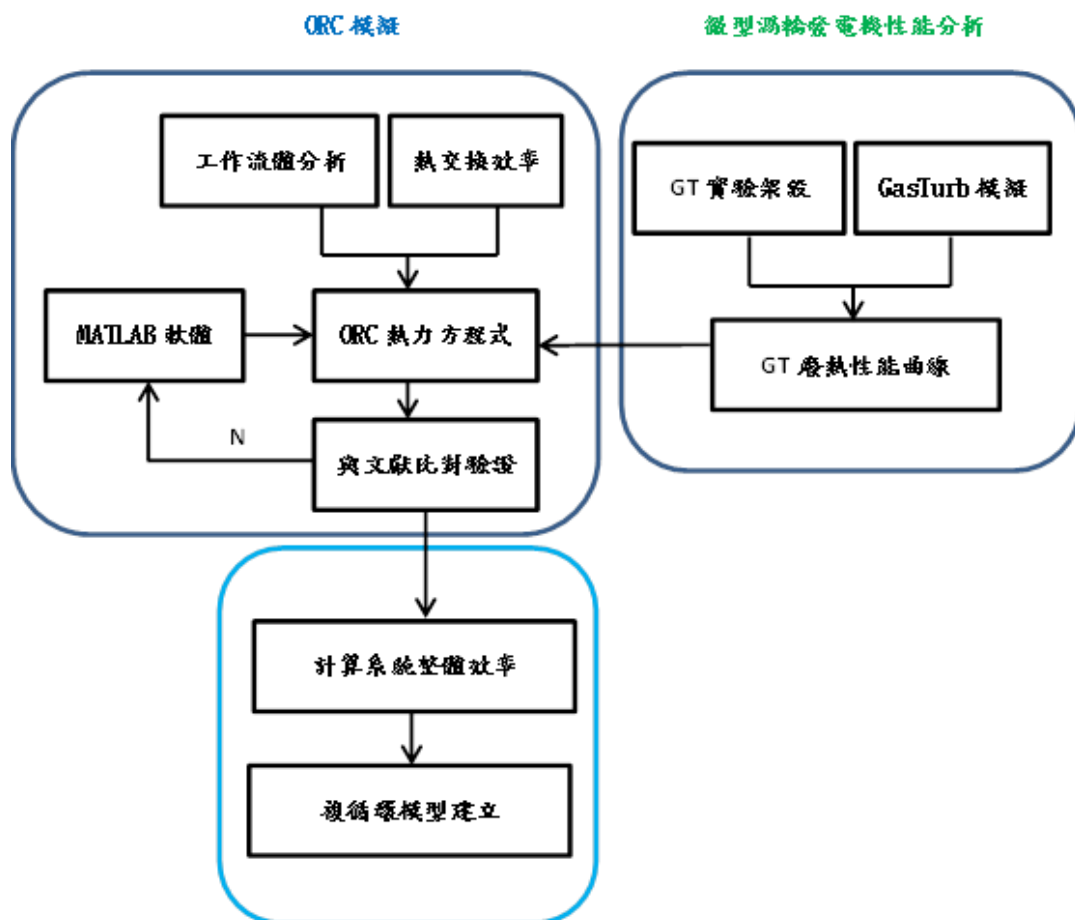


圖 3-1 研究系統架構

3-1. 微型燃氣渦輪實驗量測

3-1-1. 微型燃氣渦輪

本研究採用 JetCat SPT-5 微型渦輪發動機，並由莊秉勳學長[06]研究改良之無齒輪箱 SPT5 渦輪引擎(圖 4-2)，及選配發電機 LMT-3060(圖 3-2)進行實驗。達成最高發電瓦數 9.3kW 之微型渦輪發電機(Microturbine)，藉由實驗量測取得負載箱所能承受之極限負載內各轉速(七萬轉以下)之引擎之發電量與排氣之熱力性質。

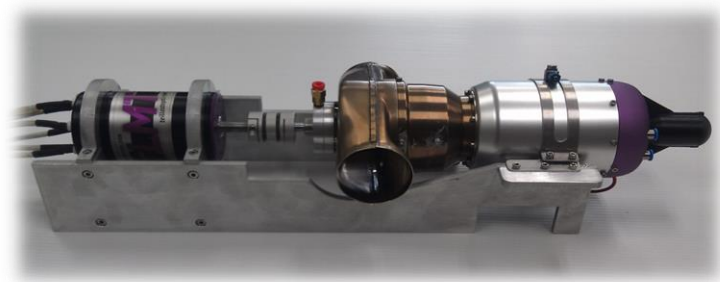


圖 3-2 無 gearbox 渦輪發電系統整體圖

3-1-2. 微型燃氣實驗程序

藉由實驗量測數據配合莊秉勳學長[06]研究所得之具齒輪箱發電系統排氣與轉速的對應關係，再參照 JetCat 公司[33]官方提供的渦輪引擎排氣溫度等三方資料進行整理分析，利用 GasTurb 計算探討於高轉速與全轉速時發電量與排氣性質，藉此奠定本複循環系統之能量來源基礎。其分析流程圖 3-3 微型渦輪發電系統研究區塊所示。根據其量測得之渦輪轉速和出口溫度對時間關係作圖得到下圖 3-4。

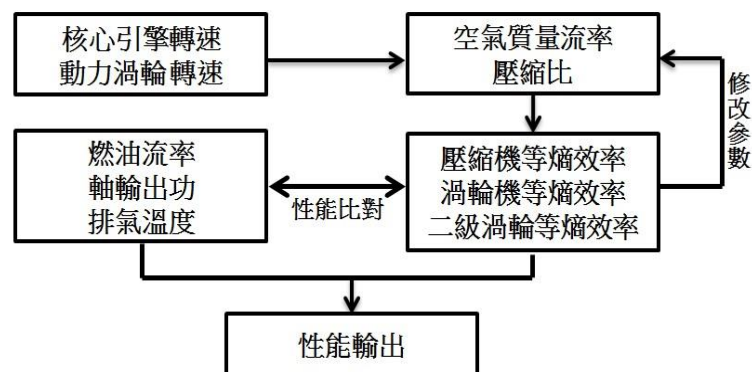


圖 3-3 GasTurb 分析方式圖

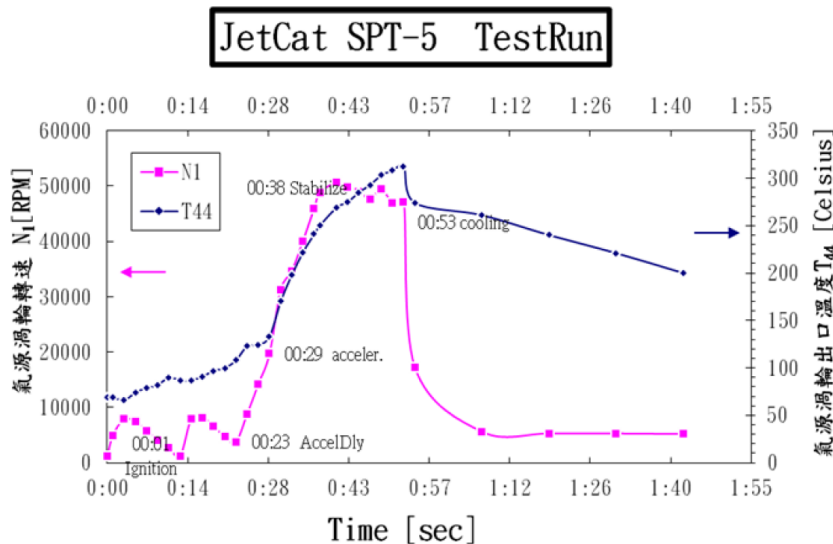


圖 3-4 SPT-5 軸引擎在怠速為 50,000RPM 之啟動程序建立

3-2. 有機朗肯循環

首先藉由實驗量測及 Gasturb 模擬獲得微型渦輪機產生的廢氣熱量，繪製出 GT 的性能曲線，並透過一熱交換循環加熱有機朗肯循環系統中的蒸發器，接著透過模擬軟體 Matlab 和有機流體熱力性質資料庫 REFPROP，計算各種 ORC 流體在不同蒸發溫度下效率，並和文獻做驗證比對，最後完成微型渦輪機與有機朗肯複循環的模型建立。有機朗肯循環(Organic Rankine Cycle, ORC)乃利用有機工作流體(Organic Working Fluid)的熱力性質將冷、熱源間的溫差熱能轉換為電力輸出。有別於蒸汽朗肯循環(Steam Rankine Cycle)發電機組受限於蒸汽性質，適用於高溫熱源(一般溫度高於 350°C)發電；ORC 發電機組可因應冷、熱源溫度範圍，選用合適工作流體，作為中、低階熱能(low exergy)回收和發電用途。因此在工作流體的選用上須考慮(1)工作溫度及壓力、(2)可用性、(3)作工元件考量、(4)熱力與傳輸性質。

3-2-1. 工作溫度及壓力

工作流體臨界點溫度需大於熱源最高溫度，避免機組運轉時，工作流體的蒸發溫度高於其臨界溫度而導致工作流體劣化或分解問題。依據 NIST 資料庫軟體，REFPROP 配合動力系統不同轉速下的蒸發溫度及冷凝溫度 30°C，探討工作流體的臨界溫度對系統循環熱效率影響。結果顯示相同的工作流體蒸發溫度和冷凝溫度條件下，若工作流體蒸發溫度與其臨界溫度相近時，其系統熱效率降低；而系統熱效率隨工作流體臨界溫度增大而提升。因此基於系統熱效率考量，宜選擇臨界溫度較高者。

ORC 迴路系統內工作流體的壓力範圍，反應機組管線工程(管線、接頭和施工的耐壓等級)和閥件(例如：中止閥、電磁換向閥等)的成本和可靠度；工作流體壓力高者，管線與各關鍵元件的耐壓程度亦高，機組成本增加。此外，亦需注意冷凝壓力是否為負壓，負壓容易導致外界空氣滲進 ORC 管路中，造成機組失效。

3-2-2. 可用性

因應低溫熱源，ORC 系統選用低沸點物質為工作流體。篩選上，考慮無毒、不爆炸、對金屬、非金屬無腐蝕作用、不燃燒、洩漏時易於察覺、化學性安定、對潤滑油無破壞性、對環境無害等為理想工作流體篩選原則目前可用的工作流體有 HFCs 和自然工作流體。HFCs 冷媒屬於長期替代工作流體，

又稱環保工作流體，未來工作流體的管制仍朝自然工作流體（如：氨、二氧化碳）發展。

3-2-3. 作工元件考量

工作流體可依其 T-s 圖飽和汽態線斜率分類為濕流體(曲線斜率 <0 ，例如水、甲醇、氨等)、乾流體(曲線斜率 >0)和等熵流體(曲線斜率無窮大)。若以濕流體為工作流體，飽和蒸汽推動渦輪機作功後，將落於兩相飽和區。由於工作流體於渦輪轉子葉片間的流速趨近於音速，將造成液滴侵蝕葉片情形，減損渦輪壽期；所以 ORC 系統的工作流體宜篩選乾流體或等熵流體。

3-2-4. 熱力與傳輸性質

具有低液態黏滯係數、高蒸發潛熱、高熱傳導係數的工作流體具有較佳熱傳效能。在相同的熱源供應下，當工作流體的蒸發潛熱越大，工作流體流量就越小，因此工作流體泵所需功率也降低。

3-2-5. 系統配置與條件假設

本研究針對以工作流體的熱力性質為狀態方程式，配合理論分析，建立元件之數學模式，在合理限制條件下，模擬系統環境溫度、引擎廢熱、工作流體流量、蒸發溫度、幫浦耗功等參數對系統之影響。為簡化分析系統，對系統作以下假設條件及參數表(表 3-1)：

- (1) 在所有管線、熱交換器中都是為一絕熱過程且無壓損。
- (2) 幫浦在壓縮過程為一等熵壓縮過程。
- (3) 有機工作流體離開熱交換器時為飽和氣態狀態。
- (4) 熱傳工作流體在熱交換器中只考慮熱輻射、熱傳、自然熱對流之熱散失，並不考慮環境風力等強制對流。
- (5) 引擎廢熱源為持續、穩定的溫度和熱量。

渦輪機等熵效率	80%
工作流體昇壓泵等熵效率	80%
動力傳輸機械效率(包括：減速齒輪組)	98%
發電機效率	90%
冷凝溫度	303K
Pitch point temperature	15K
工作流體	可用之乾流體

表 3-1 ORC 循環設定條件

3-2-6. 系統配置與條件假設

藉由輸入環境溫度、ORC 蒸發溫度、冷凝溫度及蒸發壓力，透過匯入廢熱及工作流體熱力資料，即可得到有機朗肯結合微型渦輪機系統模擬結果之輸出。圖 3-5 為系統模擬流程圖。

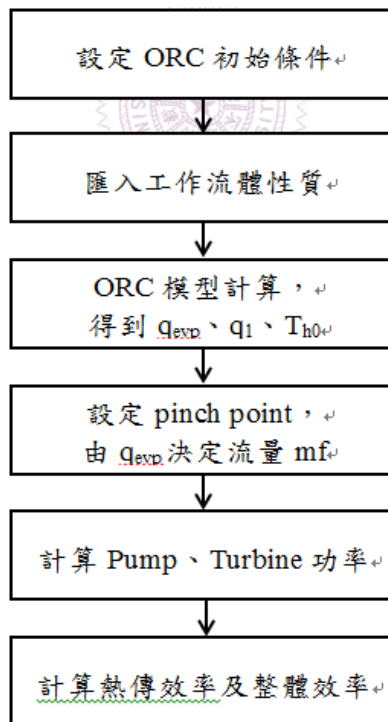


圖 3-5 ORC 系統模擬流程圖

四、研究結果與討論

本章節將分為微型渦輪機發電系統、有機朗肯循環及複循環系統共三大主軸說明研究之成果，前二部分主要為分析系統性能，最後則探討整體系統之效率及其可能應用範圍之可行性評估。

4-1. 微型渦輪機發電系統

4-1-1. 微型渦輪機參數測量

為了解該 SPT5 發電系統改良無齒輪箱後之渦輪引擎運轉程序，本論文首先實驗量測並利用影像記錄其啟動期間之轉速與第一級渦輪機出口溫度變化，藉由該影像記錄各時間點對應之狀態，並分析該系統啟動程序並繪製成圖如下：

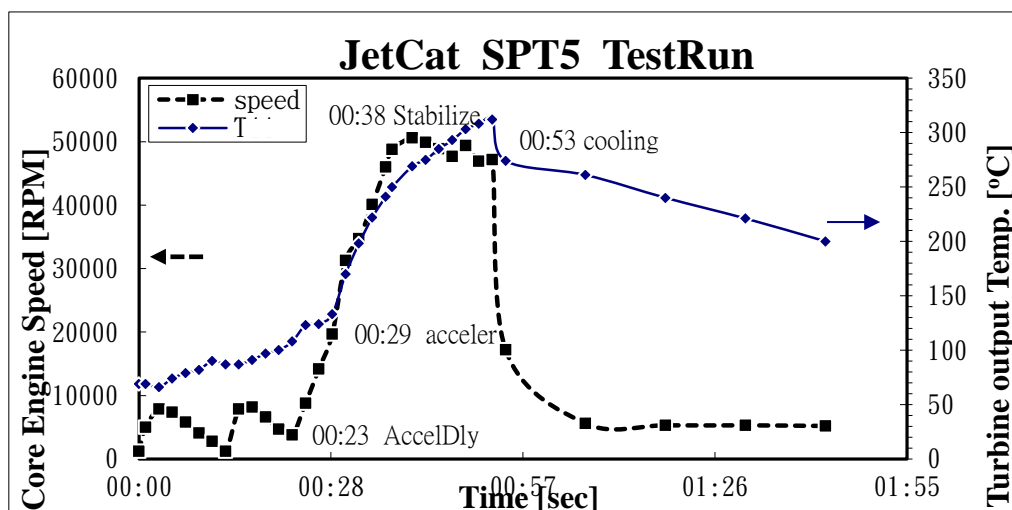


圖 4-1 SPT5 渦輪發電系統啟動程序

由圖 4-1 可知，該次量測 SPT5 啟動耗時約 38 秒。了解上述步驟著實助於本研究於渦輪引擎性能量測上數據採用之可靠度，同時加深對該引擎系統了解，提升實驗時的安全性。

本研究針對 SPT5 改良型無齒輪箱發電系統於負載容許範圍內進行系統發電量、排氣溫度及燃油消耗量之實驗量測，其轉速量測範圍為 50,000 轉至 165,000 轉，又實驗室負載箱所能消耗之最高負載量約為 3kW。量測所得數據配合 JetCat 公司[33]公佈之引擎排氣溫度與耗油量進行分析，數據如表 4-1 所示，與文獻[34] JetCat 公司公佈最高轉速性能參數分析比較，與本實驗量測數據誤差值皆小於 5%。溫度與燃油流率隨轉速增加之趨勢作圖見圖 4-2，亦可見燃油流量隨轉速改變有明顯增加趨勢，然而排氣溫度變化程度較趨平緩。

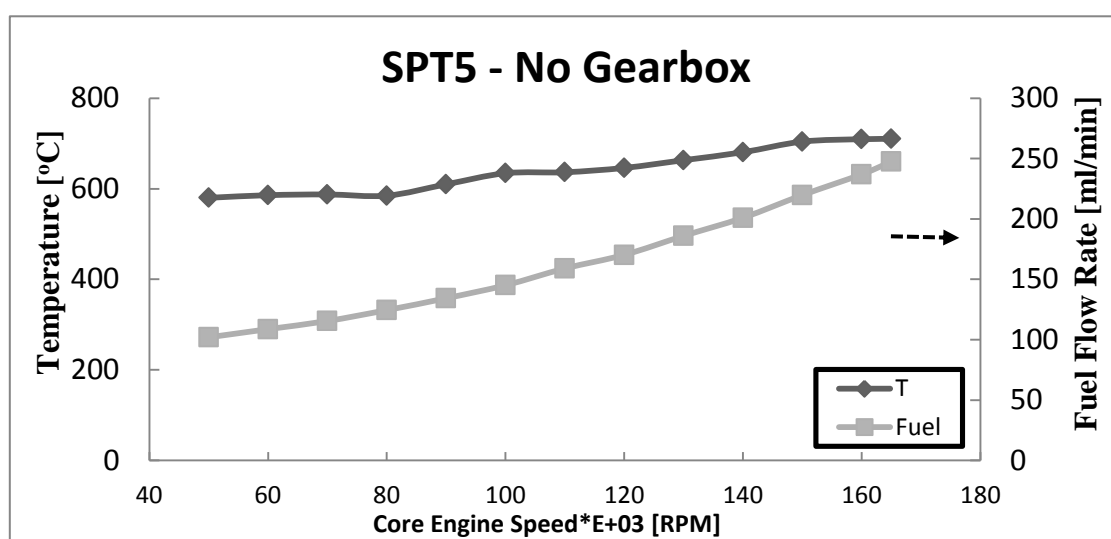


圖 4-2 溫度與燃油流率變化趨勢

4-1-2. 系統性能參數分析

為建立微型渦輪發電系統轉速性能曲線，首先引用莊學長[04]於 SPT5 尚未改良之有齒輪箱渦輪引擎實驗數據建立其空氣質量流率、壓縮比以及壓縮機與渦輪機之等熵效率。本研究將其數據輸入 GasTurb 進行分析研究，其輸出功率如圖 4-3 所示。其中，虛線為 GasTurb 進行發電系統模擬時，尚未輸入齒輪箱負載耗能比率之數值，記為 SPT5(G)_NO Load；加入齒輪箱耗能比率之 GasTurb 模擬發電引擎趨勢則記為 SPT5(G)_GasTurb；而莊秉勳學長[04]實驗數據會製成圖則記為 SPT5(G)_LMT3060。

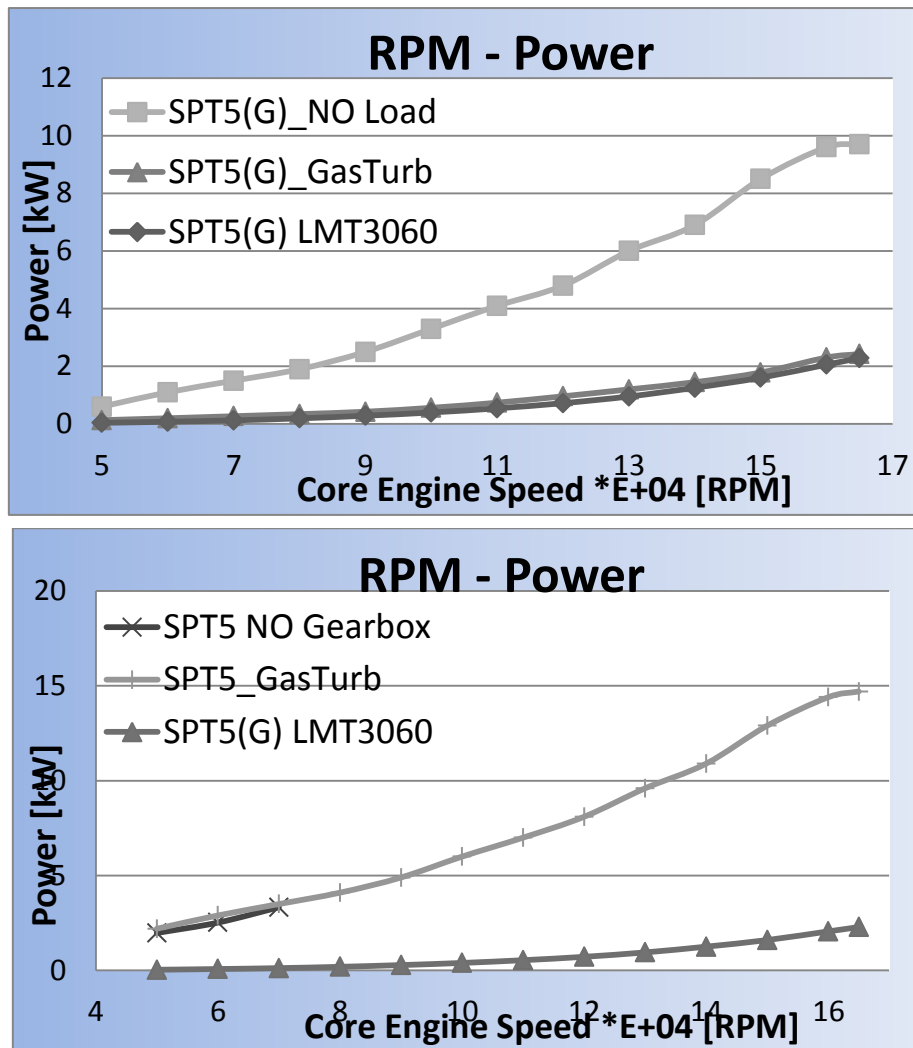


圖 4-3 有齒輪箱(上圖)和無齒輪箱(下圖)之渦輪引擎轉數和功率圖

本研究模擬分析得 SPT5 具齒輪箱渦輪引擎發電系統之齒輪箱消耗附載為 75%，亦即該發電系統動力渦輪所產生之輸出能量傳經齒輪箱會有大約 75%之能量耗損，剩餘的 25%則為實驗量測所得發電量值。扣除定量系統能源耗損比率(75%)後，此發電系統模擬所得的能量與效率大小略高於實驗所得之值，且於核心引擎轉速為 16 萬轉時有一最佳效率的性能表現。

為了避免齒輪箱所造成的能量耗損，另外改良了無齒輪箱之渦輪引擎做測試，可有上圖 4-3 做比較，本研究分析 SPT5 改良型發電系統採用未改良前之系統壓縮比、壓縮機與渦輪機等熵效率，且調整空氣質量流率於 GasTurb 軟體中進行分析，與實驗數據相互比較發現其誤差皆小於 5%，因此利用此法求出全轉速之系統性能。由結果得知，於 160,000 轉具有 10.4%的效率值，大於具齒輪箱系統的 2.3%效率，此效率提升即為莊秉勳學長[04]研究之重要成果。

4-2. 有機朗肯循環

4-2-1. 模擬程式驗證

本節首先對撰寫之模擬程式與文獻進行比對驗證，以確認程式之準確度與可靠性。待驗證程式之後，進行系統各項參數最佳化，探討有機朗肯循環之參數最佳化設計。

本研究模擬有機朗肯循環之性能分析，模擬之條件將比照文獻[10]內所設定之參數，並對 Capstone 公司所生產研發之 C30、C65、C200 做性能分析與結果比對驗證。

為了減少本實驗與文獻之誤差，在有機朗肯循環中的各項熱力性質與效率之設定皆採用如文獻所模擬之條件，有機工作流體性質採用 NIST 所建立的資料庫 REFPROP 來進行模擬，並帶入本研究的程式進行計算，其各項條件假設如下：

- 壓縮機等熵效率:80%
- 渦輪機等熵效率:80%
- 蒸發器出口乾度:1
- 冷凝溫度:303K
- 冷凝溫度:303K
- 蒸發器熱交換器效率:70%
- 發電機效率:85%
- 工作流體:R113、R245fa、R123、R236fa

渦輪機參數：

GT 輸出功(KW)	發電效率(%)	排氣流量(kg/s)	排氣溫度(K)
30	26	0.31	548
65	29	0.49	582
200	31	1.30	553

表 4-1 Cpastone 渦輪機參數

假設條件設定完成後，如文獻內所示，將以 30KW 的 GT 進行模擬，比照文獻設定所模擬出之結果，而下圖為此結果比對文獻內附圖之模型驗證結果：

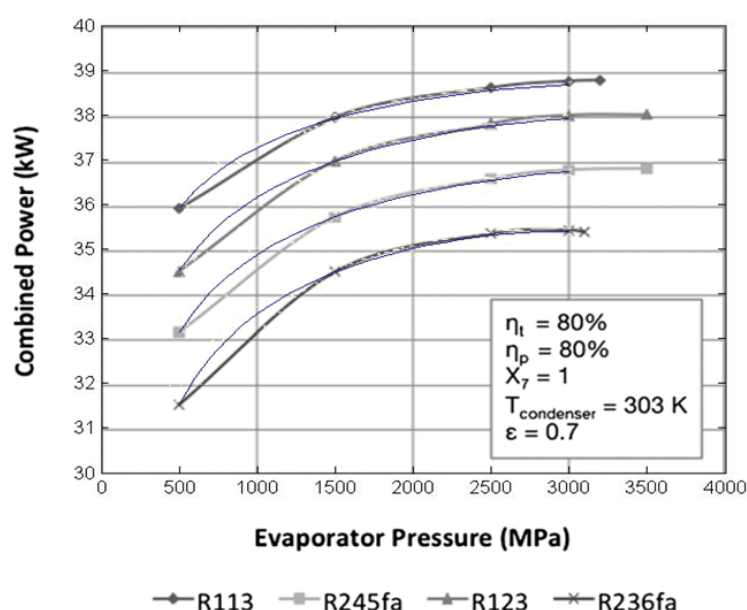


圖 4-4 文獻驗證比對(細線為模擬數據，粗線為文獻數據)

從上圖可以看出，以文獻之各項條件及假設帶入本研究模型後，所得到之結果相較於文獻之數據，顯示其誤差極小，故後面的模擬進行將以驗證之結果做為依據，依序進行各項參數之分析。

4-2-1. 工作流體蒸發溫度與壓力

工作流體之選用由 3-2-1 中所論述，對可用之乾流體進行熱力循環模擬，分析 ORC 系統之熱效率，

並設定工作流體蒸發溫度 T_{\max} ，其值為各流體兩相區右方的汽化線上之熵最大值 S_{\max} 所決定，如下圖所示：

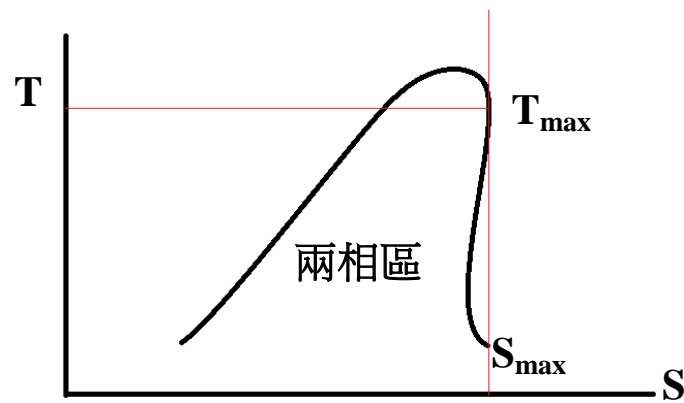


圖 4-5 最大蒸發溫度與熵值

取得最大蒸發溫度 T_{\max} 後，亦可同時取得最大蒸發壓力 P_{\max} ，由 500kPa 至 P_{\max} 之間進行模擬，探討各種流體在不同蒸發壓力下之效率表現，結果如圖 4-6 及圖 4-7。

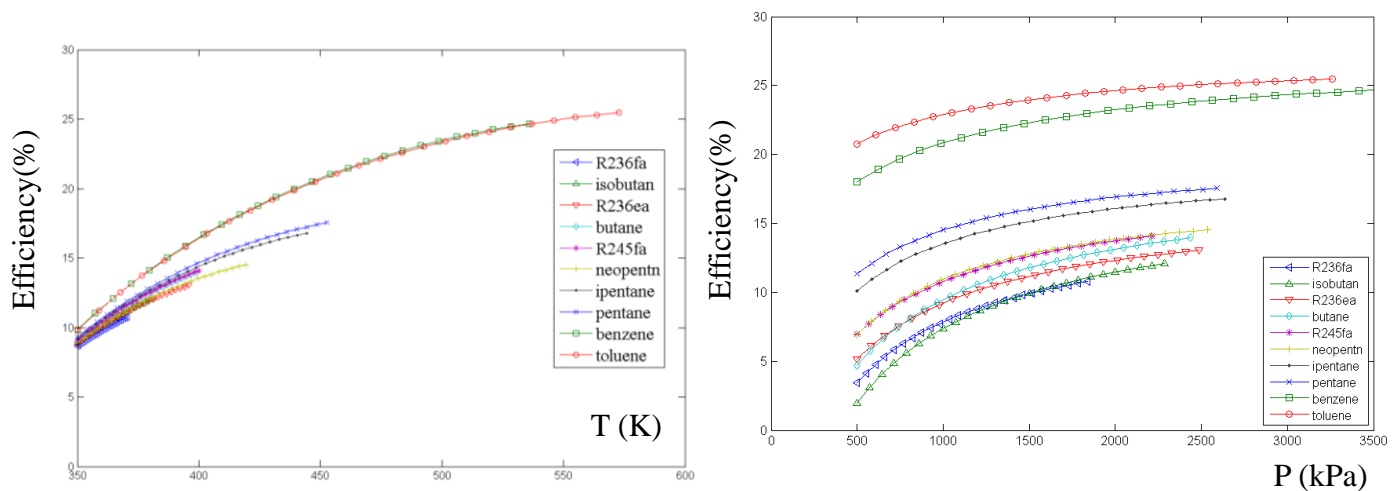


圖 4-6 不同流體之蒸發溫度(圖左)及蒸發壓力(圖右)之效率比較

上圖內之流體表格是以各流體臨界溫度做為排序，由臨界溫度最低的 R236fa 至最高的 toluene。結果可明顯看出，臨界溫度越高之流體，其完成一循環後所能得到的熱效率越高，且發現在相同工作流體下，流體之蒸發壓力越高，系統的熱效率亦越高，經由上述之結果可得知，若 ORC 系統內選用適當的工作流體與蒸發壓力，ORC 系統之最高效率將可達到 25% 以上。本研究將會針對常用工作流體 R245fa 及效率最高之 toluene 進行研究。

4-2-2. 過熱度(superheat)

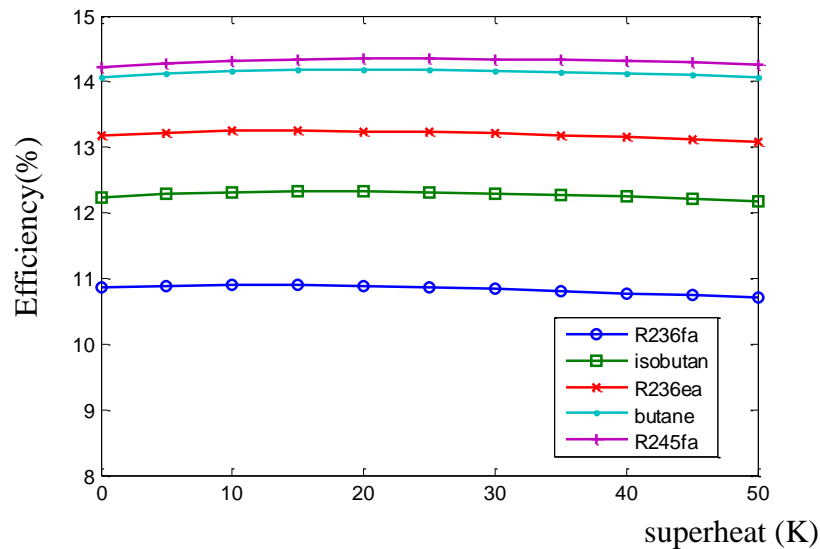


圖 4-7 過熱度對效率之影響

由上圖可看出，增加過熱度對系統效率的影響並不明顯，對某些流體而言，增加些許過熱度能提升熱效率，但增加幅度不大，若繼續增大過熱度，系統效率將會開始降低，結果顯示增加過熱度對系統效率的提升幫助不大，且還需額外配備過熱器(superheater)，在效益和成本的考量之下，本研究將不考慮過熱度的影響。

4-2-2. 再生器(recuperator)

再生器被廣泛地應用在許多熱力循環內，再生器能為系統回收廢熱，將膨脹後過熱流體所帶的餘熱，經由再生器傳回壓縮過後的冷端流體，使得排出廢熱減少，且輸入熱量也能減少，工作流體在相同流量下能產生出更多輸出功，效率亦能因而隨著提升。圖 4-8 為再生器運作示意圖。

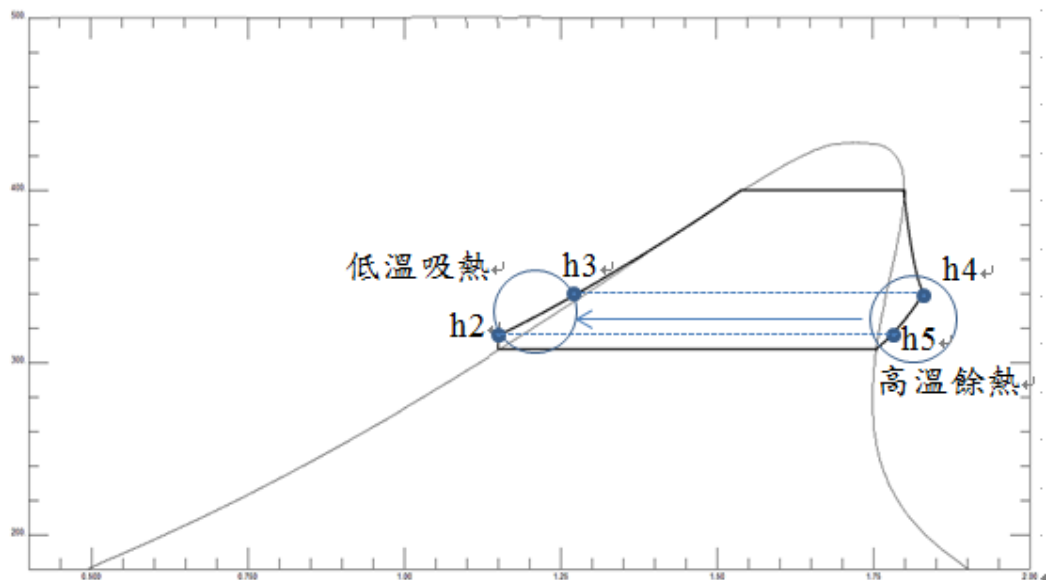


圖 4-8 再生器示意圖

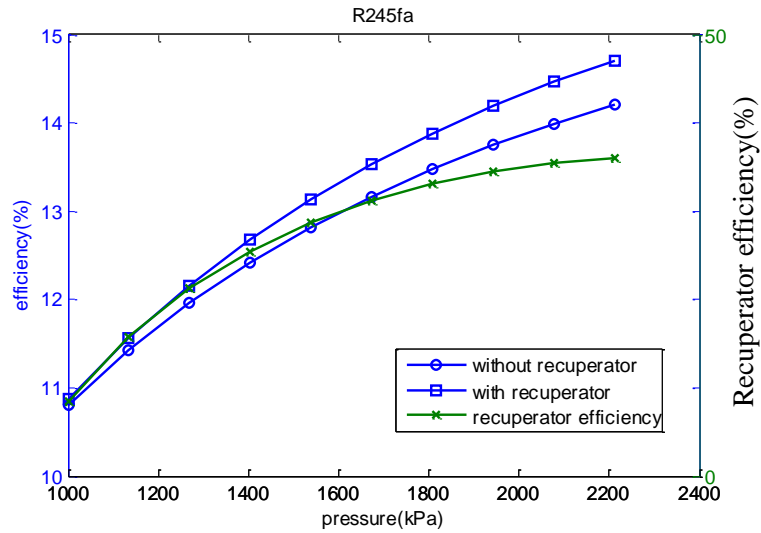


圖 4-9 再生器對 R245fa 之效率影響

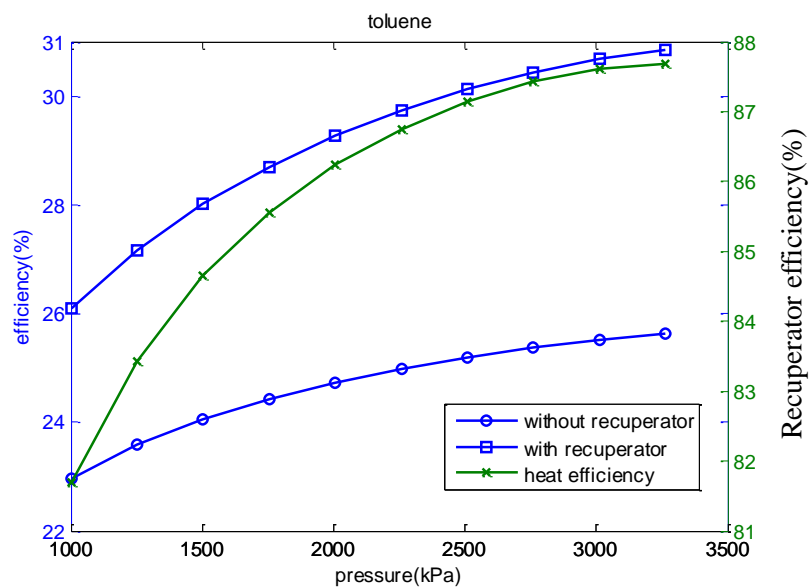


圖 4-10 再生器對 toluene 之效率影響

由上兩張圖可以明顯看出，再生器對 R245fa 的影響較小，大約只能提升 0.5% 的系統效率，且再生器效率只有約 40%，而 toluene 能提升的效率則可達 5% 以上，再生器效率可高達 87.5%，主要原因為 toluene 的蒸發溫度較高，相對的渦輪機出口溫度也較高，能提供的熱量因此提升不少，此結果亦可同理解釋同流體在越高蒸發壓力下，再生器效率越高，且系統效率能提升越高的現象。

4-2-2. 超臨界循環

由前幾節的模擬結果可得知，工作流體蒸發壓力對系統效率有著顯著的影響，若要提高系統壓力以提升系統效率，則需將蒸發壓力提高至工作流體的臨界壓力之上，此循環可被稱為超臨界循環 (supercritical) 或是穿臨界循環 (transcritical)，而本研究將對超臨界循環做一初步的基本效率分析，以供後續研究方向之參考，下圖為超臨界循環與次臨界循環比較圖：

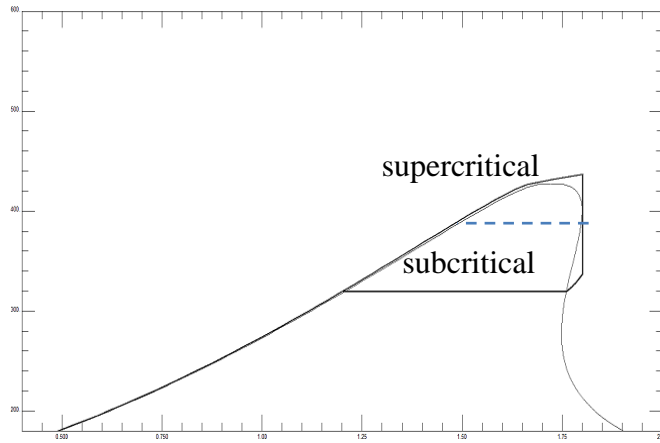


圖 4-11 超臨界循環示意圖

由圖可以看出超臨界循環的吸熱過程將不再經過兩相區，此項改變也導致了超臨界循環效率較高的結果，而本研究所模擬超臨界的最高溫度是由如圖 4-9 定義的 S_{\max} 所決定，其他假設條件皆比照次臨界循環的設定進行模擬。

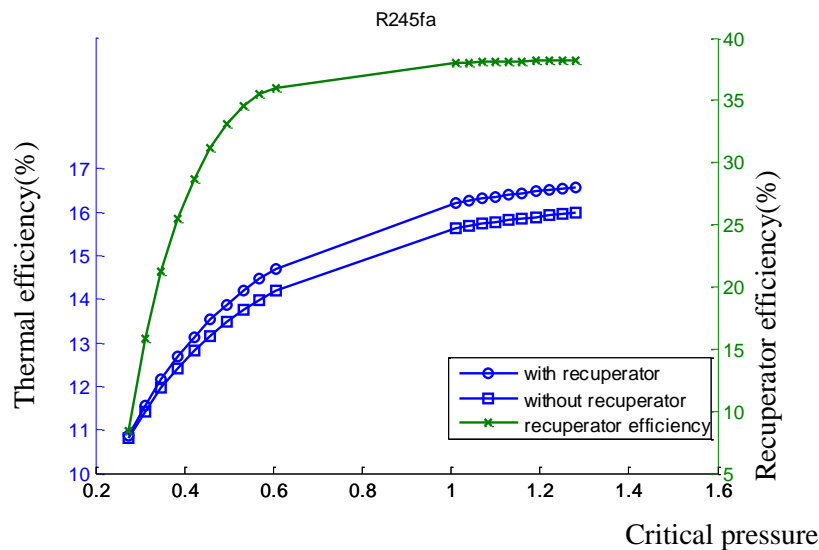


圖 4-12 超臨界 R245fa 效率圖

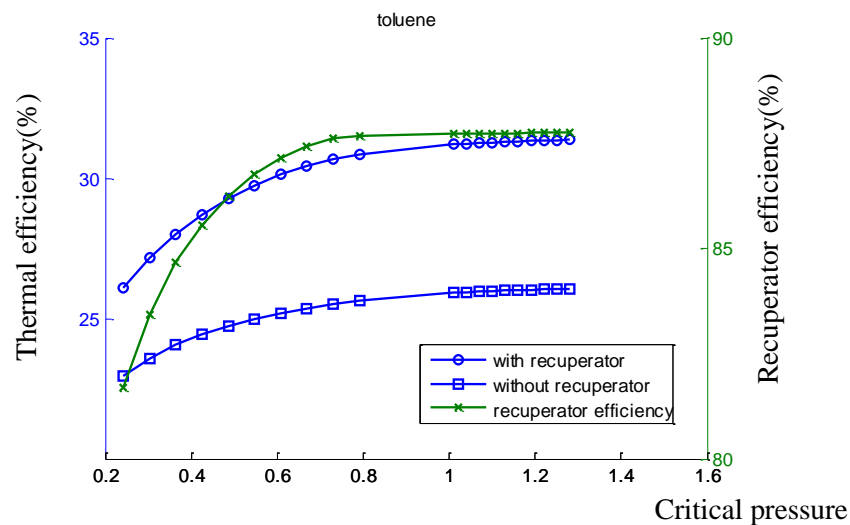


圖 4-13 超臨界 toluene 效率圖

由模擬結果可以得知，超臨界循環確實能提升系統效率，流體為 R245fa 時約可增加 2% 的效率，

流體為 toluene 時約可增加 1%效率，但再生器效率方面似乎已達飽和，沒有產生明顯的變化，R245fa 約為 38%，toluene 約為 87%，故超臨界循環與次臨界相比，再生器能提升的系統效率其值變化不大。

4-3. 複循環系統

由 4-1 及 4-2 所探討的結果，可以合併兩系統為一複循環系統，連結兩系統後將估算出總發電量及系統總效率，並對此循環之可行性做一評估與分析。

4-3-1. 熱交換過程

由於兩系統間的溫差較大，故需特別考慮到熱量傳遞的方式，而為了保護 ORC 工作流體不在高溫下產生劣化，本研究將另外使用熱交換工作流體自渦輪機廢氣傳遞熱量至 ORC 系統內，以確保 ORC 運作之穩定性。

模擬方法首先由 GT 廢氣溫度於死態(303K)之間的溫差計算出總熱能，並繪出 GT 廢氣 T-Q 曲線，再繪出熱交換流體於設定之熱交換溫度及 GT 廢氣死態溫度(303)之間區段 T-Q 曲線，最後繪出 ORC 流體在熱交換 T-Q 曲線固定下所能得到最大吸收熱，若熱交換循環之總熱量大於 ORC 所能吸收總熱量，則將熱交換低溫端溫度提升，再次計算 ORC 吸收熱量，並重複求解，直到熱交換流體總熱量等於 ORC 吸收總熱量為止。以下為使用 R245fa 及 Toluene 兩種 ORC 工作流體所模擬出的熱交換結果。

● R245fa

因為複循環內共有兩次熱交換的過程，故會有兩個 P.P 產生，分別在渦輪機廢氣傳熱至熱交換流體以及熱交換流體傳熱至 ORC 兩過程之間發生，在 R245fa 次臨界循環中熱交換流體的最高溫度設定為 150°C，以符合銅水熱交換器的可用範圍之內，而熱交換流體為水，本研究之熱交換效率定義為渦輪機排氣總熱量分之 ORC 系統所吸收之熱量，且假設熱交換循環為一封閉循環，可藉由調整熱交換流體之流量改變高低兩端溫差，而各管路間皆假設無熱傳散失。

圖 4-14 之蒸發壓力較低，圖 4-15 之蒸發壓力較高，由兩圖比較可以明顯看出蒸發壓力越高時，熱交換效率降低，但系統總效率仍然提升，結果如圖 4-16 所示。

在次臨界循環中，P.P 出現在工作流體乾度為 0 的位置，因為進入蒸發潛熱區導致其點之斜率有明顯之轉折，但在超臨界循環中，隨著壓力提高，此轉折點將漸趨模糊，故在超臨界循環中 P.P 之位置並非固定，熱交換流體最高溫度也將提升至 200°C。

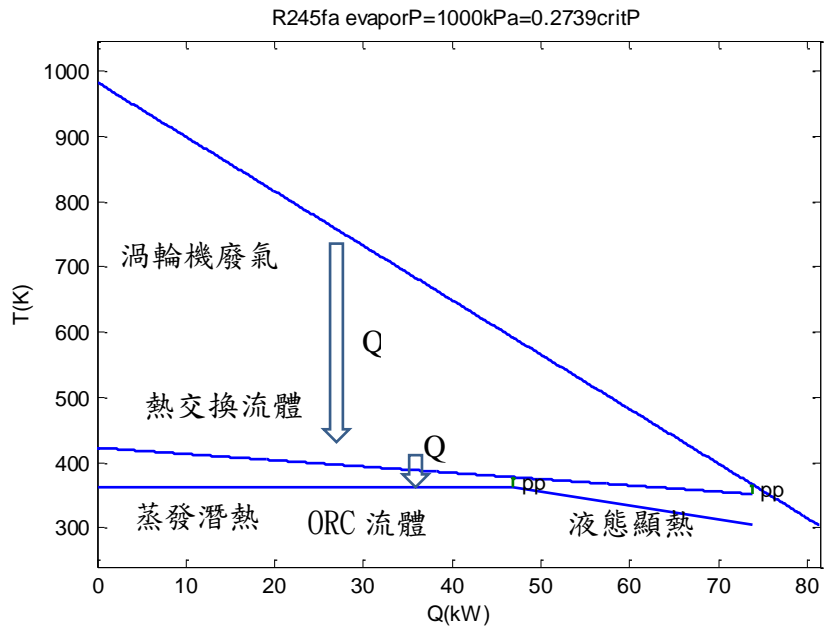


圖 4-14 R245fa 熱交換示意圖@1000kPa

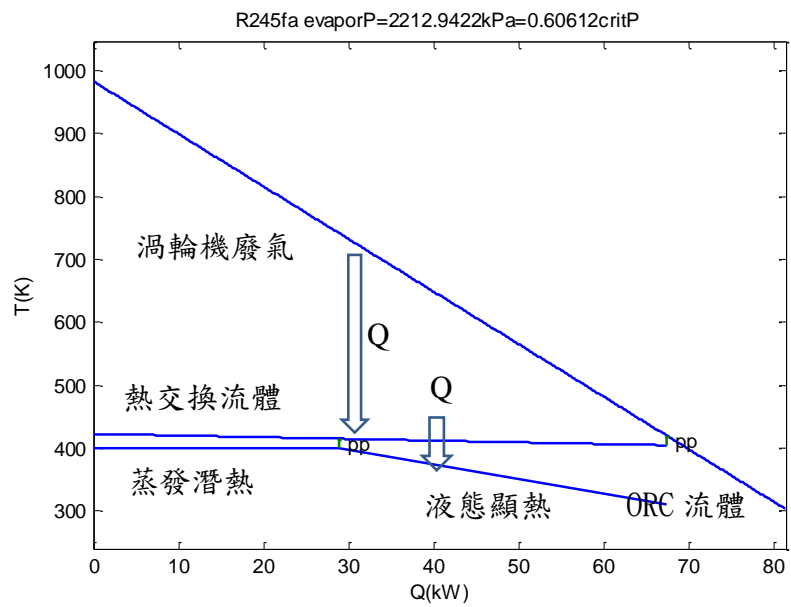


圖 4-15 R245fa 熱交換示意圖@Pmax

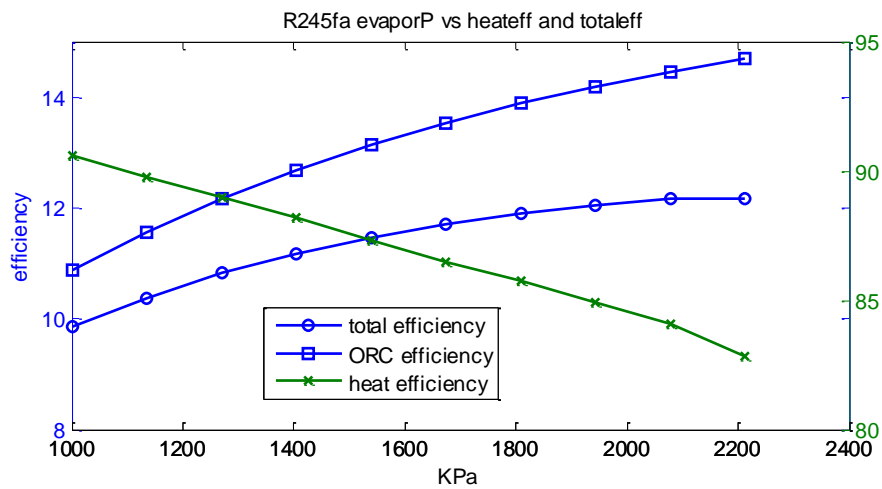


圖 4-16 R245fa 熱交換與總效率

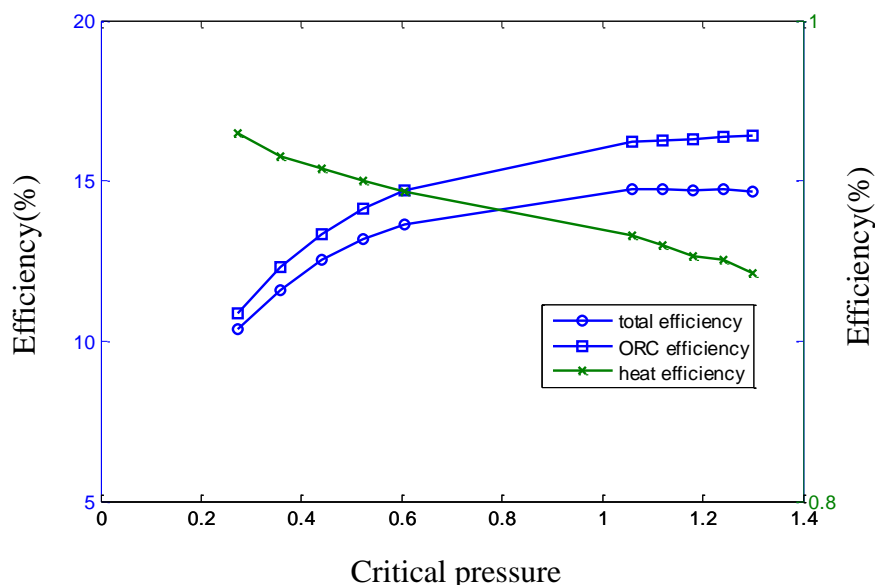


圖 4-17 超臨界下 R245fa 之熱交換與總效率

圖 4-17 為超臨界 R245fa 之熱交換與總效率，用以和次臨界下做比較。由於超臨界中的 P.P 位置並非固定，流體流量取值不易，此結果造成圖 4-17 中熱交換效率產生不連續情形，且亦可發現，若提升熱交換流體溫度，將能提升整體效率，由次臨界循環中 10%~12% 提升到超臨界 10%~14%，但相對的設備成本亦會隨之提高。

● Toluene

以上皆為 R245fa 的模擬結果，接著將會對 toluene 進行同樣的熱交換模擬分析。由於 toluene 再次循環中的最高蒸發溫度約為 550K，故模擬設定首先將次循環 toluene 的熱交換流體最高溫度設定為 600K，其他條件皆不改變。

由於 toluene 蒸發溫度較高，導致如圖 4-20 熱交換效率降低的現象，也使得乘上熱交換效率後的總效率，產生在 1500KPa 總效率有一最大值，當壓力繼續提升，總效率反而下降的情形。

在超臨界 toluene 的循環中，為了符合超臨界流體的溫度，熱交換流體將提升至溫度 650K，但在此溫度下產生一特別現象，次臨界循環中的 P.P 點不再位於工作流體乾度為 0 的地方，將位於過冷液態區段，造成此結果的主要原因為熱交換流體能量曲線的斜率已經趨近於 toluene 過冷區的斜率，若再將熱交換流體最高溫度繼續提升，將導致熱交換流體能量曲線斜率大於 toluene 過冷區的斜率，而此結果將會導致 P.P 的位置會位於壓縮機出口(無再生器)或再生器出口，此情形下工作流體最大流量的計算將會由整體吸收之熱量(潛熱加顯熱)決定，而非前述由潛熱單一決定。

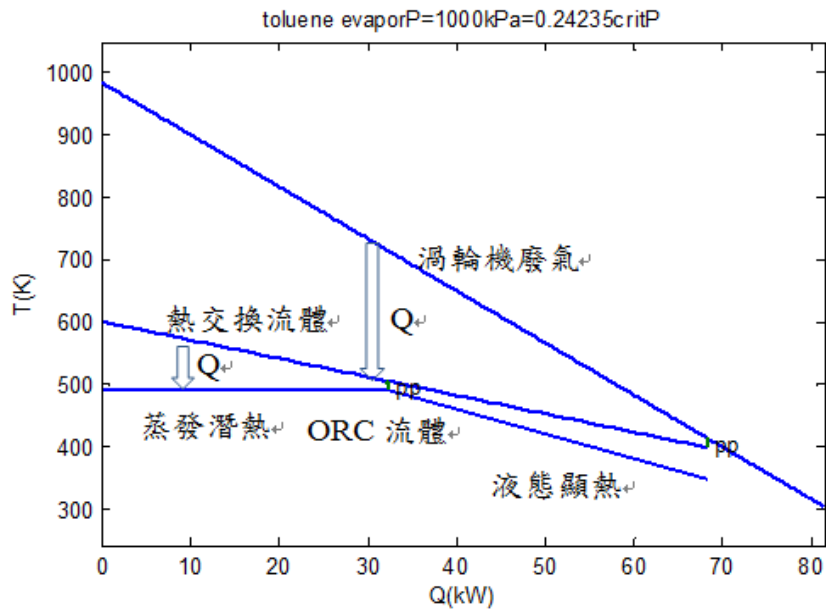


圖 4-18 Toluene 熱交換圖@P=1000kPa

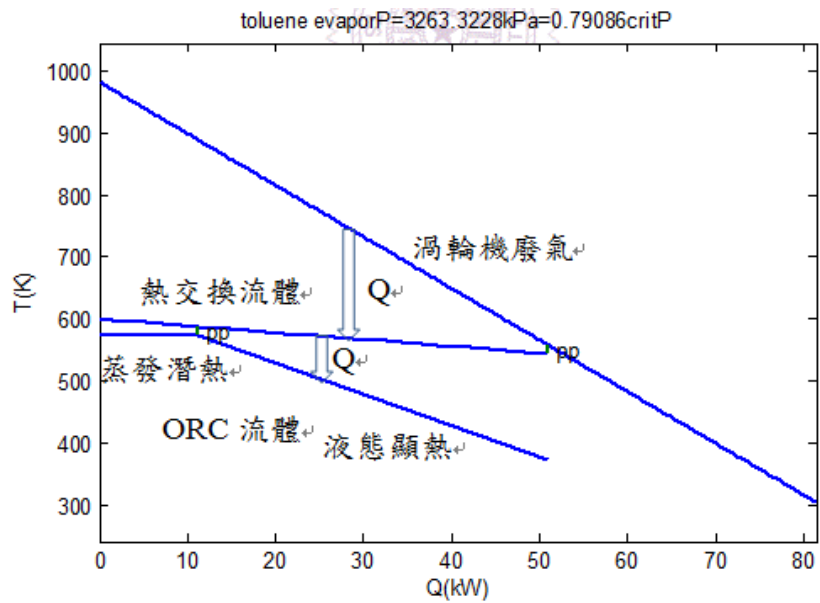


圖 4-19 Toluene 熱交換圖@Pmax

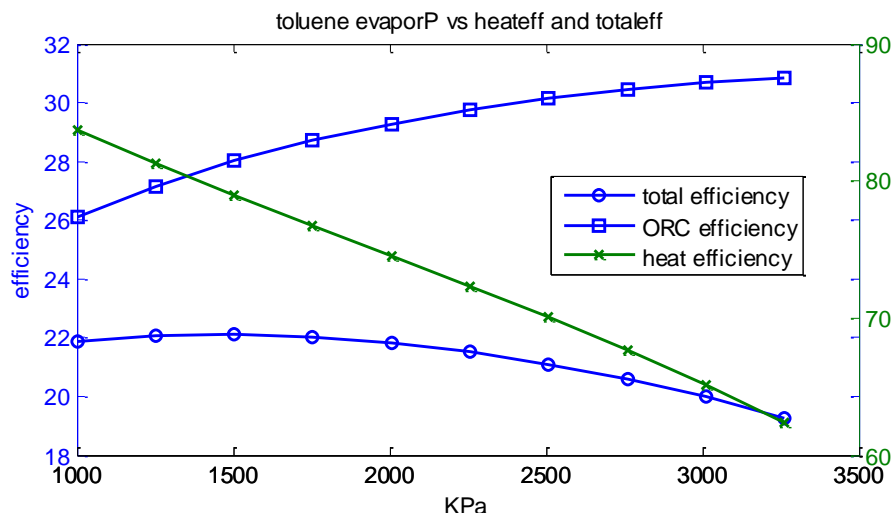


圖 4-20 Toluene 熱交換與總效率

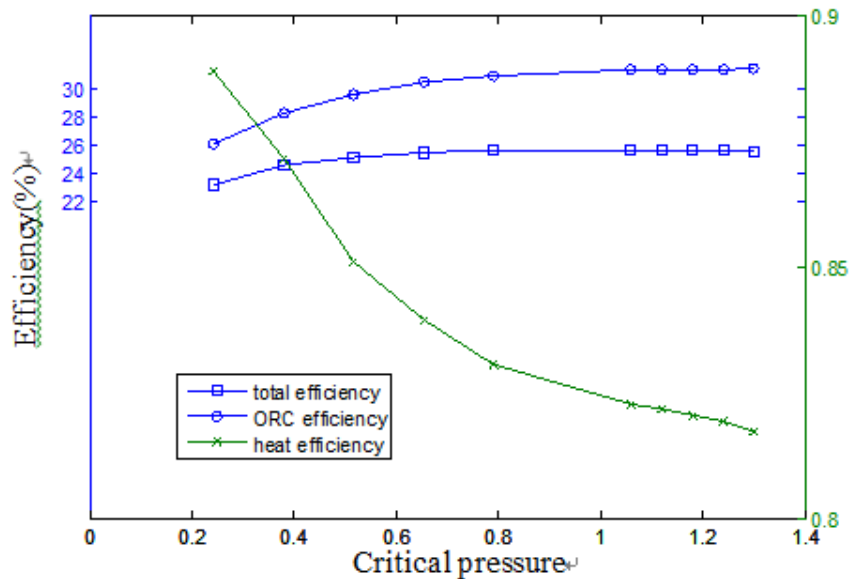


圖 4-21 超臨界 Toluene 熱交換與總效率

圖 4-21 為超臨界下 Toluene 之熱交換與總效率，使用 toluene 作為工作流體之 ORC 系統其最高總效率約可從 24% 提升至 26%，但 toluene 流體要求在比其他有機流體相對高溫的場合應用，以達到符合成本之效率提升。

4-3-2. 複循環效率成本評估

SPT5 微型渦輪發電機於不同轉速下，不僅輸出功率有所改變，甚至排氣溫度與排氣熱量皆有不同之變化趨勢，其能量與渦輪發電系統轉速關係如圖 4-22 和圖 4-25。本研究最後選定 R245fa 及 Toluene 蒸發壓力為次臨界內的 P_{max} 以及超臨界下 1.15 倍的臨界壓力，並加上再生器、熱交換效率及發電機效率(90%)進行計算，最後將由中油網站所提供的航空燃油 Jet A-1 價格計算出複循環系統發出一度電所需之價格。

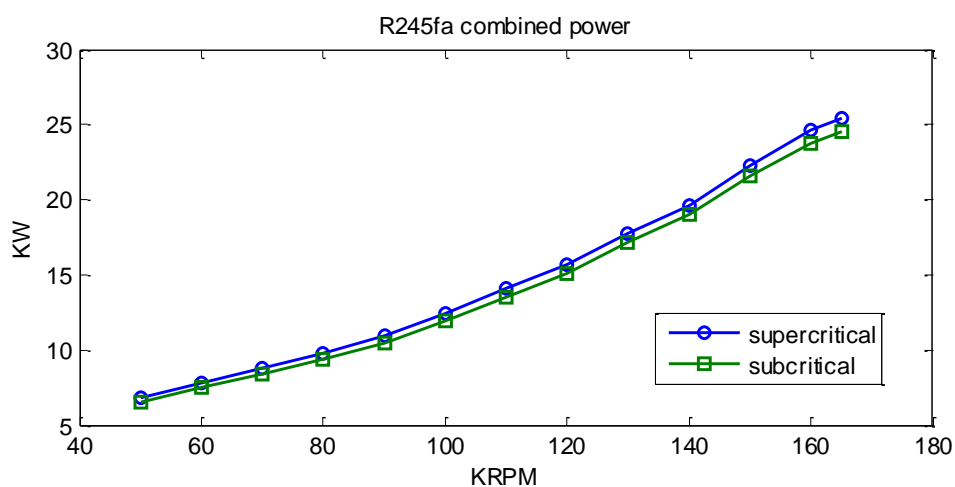


圖 4-22 Power of combined R245fa ORC and Gas Turbine(GT)

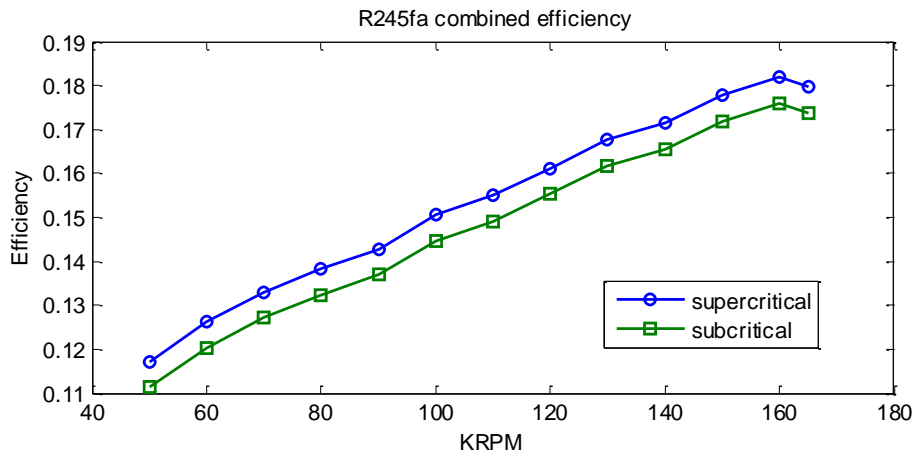


圖 4-23 Efficiency of combined R245fa ORC and Gas Turbine(GT)

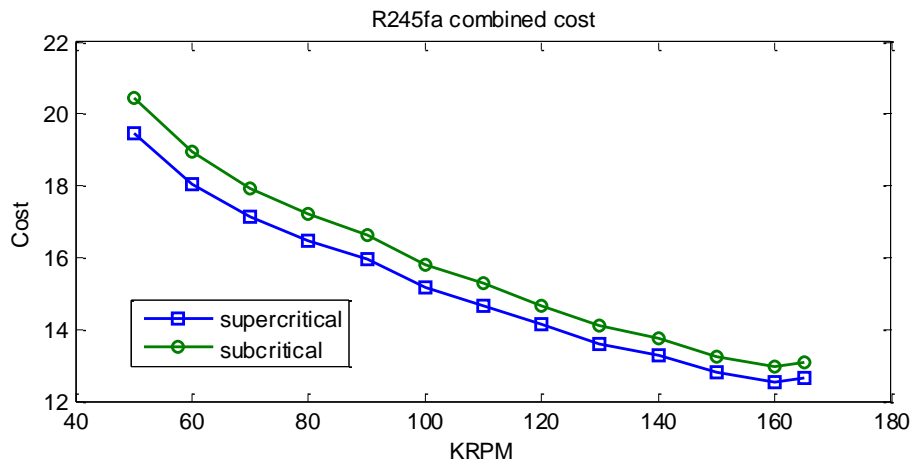


圖 4-24 Cost of combined R245fa ORC and Gas Turbine(GT)

以 R245fa 為流體的複循環系統內，超臨界循環約可比次臨界循環高出 1% 的效率，如圖 4-22，超臨界最高總效率可達 19%，次臨界約為 18%，最高效率皆發生在 GT 為 16 萬轉時，而發出一度電的成本最低僅需 12 元新台幣，如圖 4-24。

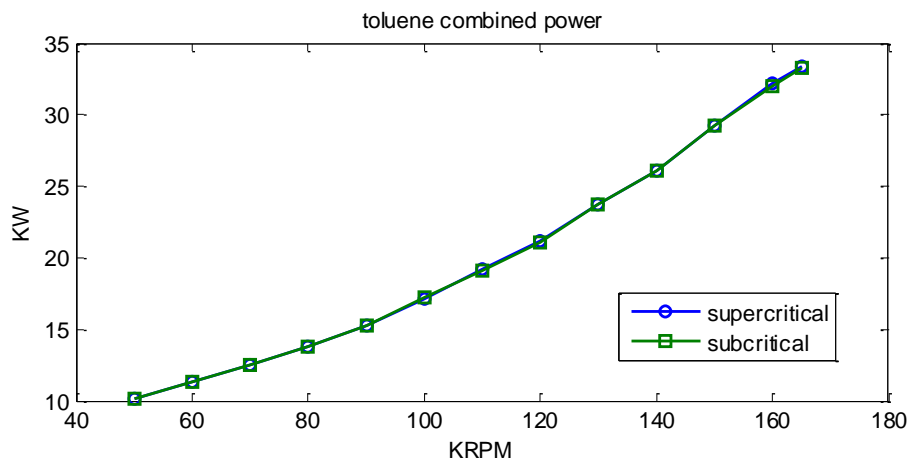


圖 4-25 Power of combined Toluene ORC and Gas Turbine(GT)

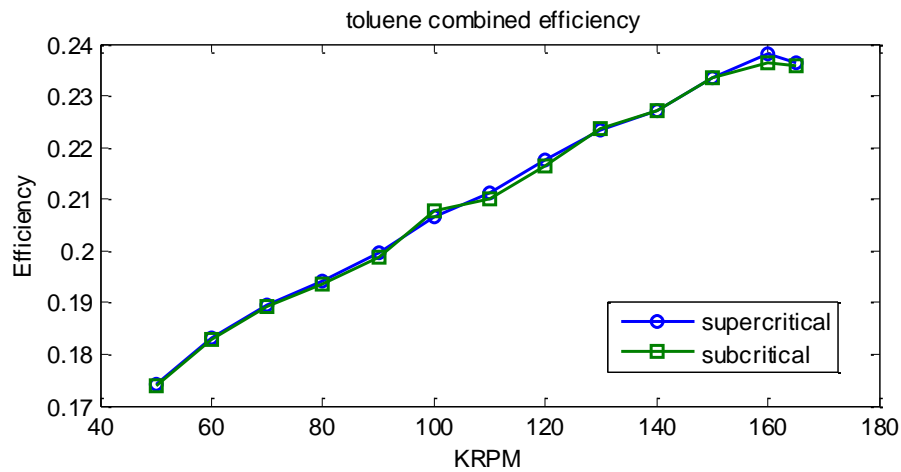


圖 4-26 Efficiency of combined Toluene ORC and Gas Turbine(GT)

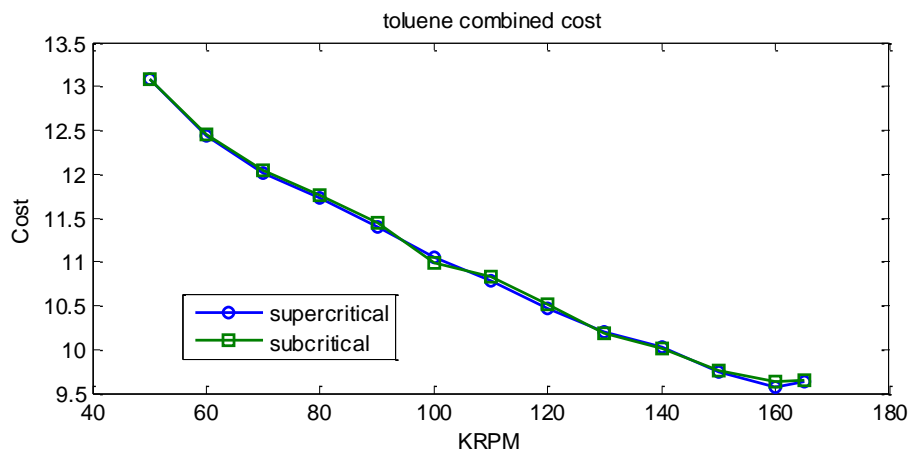


圖 4-27 Cost of combined Toluene ORC and Gas Turbine(GT)

在工作流體為 toluene 的複循環內，ORC 的蒸發壓力在次臨界及超臨界下，可以看出影響輸出功不是很明顯，如圖 4-25，但整體看來超臨界 ORC 其效率仍是略高於次臨界。由圖 4-26 可以看出複循環系統最高效率出現在 GT 為 16 萬轉時，其總效率約可達 24%，而 Jet A-1 的價格約為 27.07 元/公升，經計算後可得知 16 萬轉時每發出一度電的成本約為 9.5 元新台幣，如圖 4-27 所示。

表 4-2 總結了本研究複循環於最佳效率點(16000rpm)之數據，由其可得知本系統若應用在偏遠地區或是緊急發電的場合使用，其體積小且易於攜帶及搬運的優點，預期將會有相當程度的應用價值，而在某些電力價格相對較貴的國家，本複循環系統亦可作為一般家庭或小型社區的獨立發電系統。

	Output(kW)	Efficiency(%)	Cost(NT.)
Subcritical R245fa	23.78	17.58	12.9499
Supercritical R245fa	24.6483	18.22	12.4937
Subcritical toluene	31.9801	23.65	9.6294
Supercritical toluene	32.1981	23.81	9.5642

表 4-2 SPT5@16000rpm 結合 ORC 複循環

4-3-3. 系統性能比較

於本研究使用之渦輪發電系統為自主研發，與目前市售知名之渦輪機發電系統 Capstone 公司的產品相比，本研究之渦輪機屬於微型等級，其發電量較小且本身並無熱回收裝置，導致本研究渦輪機系統效率無法與之相比，但若加上 ORC 組成之複循環系統，輸出功可達 35KW，且效率可達 25%，若與 Capstone 的 C30 相比，發電量多了 5KW，而效率則在伯仲之間。因為 C30 的排氣溫度較低，約為 550K，對於本研究先前使用的工作流體 toluene 而言太過低溫，為了配合 C30 的排氣溫度，將選用的工作流體為 pentane，且無須熱交換循環即可運作，以下即為結合 C30 後之複循環模擬結果。

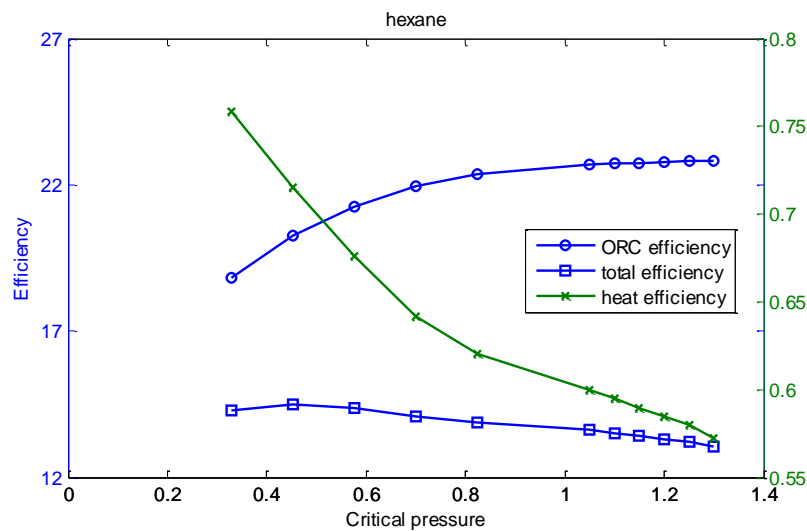


圖 4-28 Hexane ORC 系統效率圖

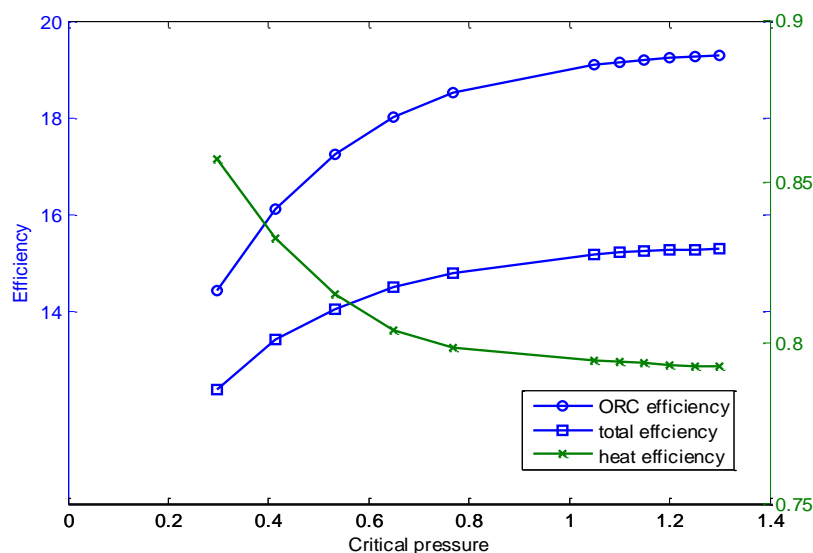


圖 4-29 Pentane ORC 系統效率圖

由圖 4-28 及 4-29 可發現，雖然 hexane 的 ORC 效率比 pentane 高，但因為 hexane 的蒸發溫度太接近 C30 的排氣溫度，導致熱交換效率降低，故乘上熱交換效率後總效率會比 pentane 還低，故將以 pentane 來結合 C30 進行模擬。

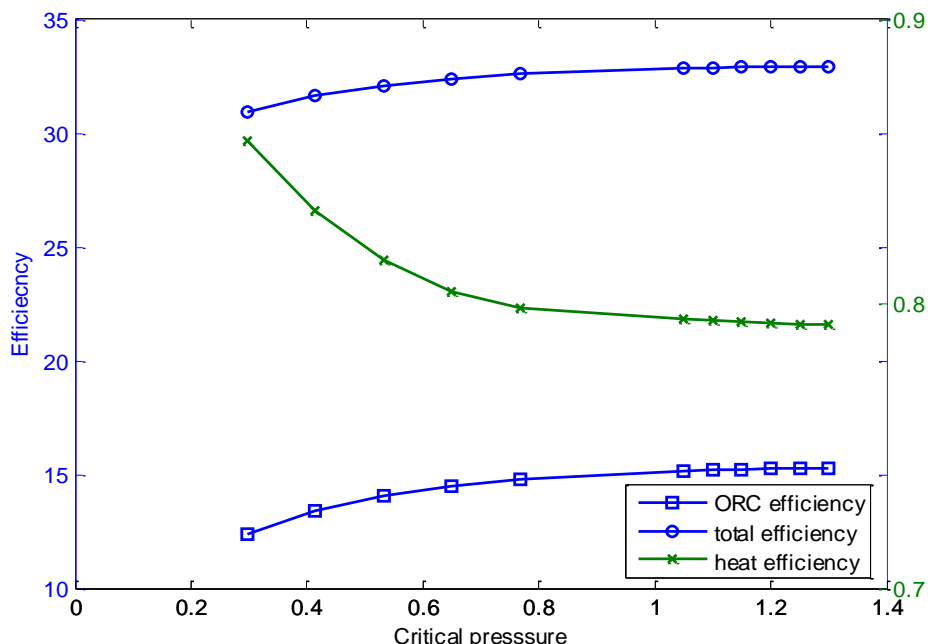


圖 4-30 C30 結合 pentane ORC 之複循環系統

結合 ORC 後的 C30 複循環系統總效率可達 33%，其效率提升的幅度較本研究小，主要因為 C30 本身有熱回收裝置，排氣溫度較低，使得能使用的 ORC 流體受到限制，故會造成 ORC 循環回收效率較低的現象，各系統效率及輸出功之比較如表 4-3。

	單循環	複循環	單循環	複循環
	SPT5	SPT5+ORC	C30	C30+ORC
效率(%)	10.7	24	26	33
輸出功(KW)	14.4	34.2	30	39.2
一度電價(NT.)	21.3	9.5	8.7	6.9

表 4-3 各系統性能及成本比較

五、研究結果與討論

本研究之複循環系統延續莊秉勳[04]改良之 SPT5 渦輪發電系統進行設計，提高引擎轉速可提升其發電功率，但耗油量也隨之提升，使系統最大發電效率於 160,000 轉時達 10.65%。本研究模擬有機朗肯系統以 Matlab 撰寫並與文獻數據驗證，其誤差值皆小於 1%，隨之完成一具有參數分析之模擬程式建立。本研究流體皆選用乾流體，對於過熱度並無絕對之需求，由於本研究內皆使用最高蒸發溫度的情形下，必然需要加裝再生器以提高系統之整體效率。本研究工作流體選用 R245fa 及 toluene 模擬在次臨界及超臨界下的效率差異比較。R245fa 在次臨界及超臨界下效率為 17.58%和 18.22%；

toluene 在次臨界及超臨界下效率為 23.65%和 23.81%。toluene 流體本身適用在較高溫回收熱源，而本研究之熱源在 160,000 轉達 600°C 以上，故 toluene 之效率表現較 R245fa 佳。經由模擬後發現到超臨界循環之系統效率確實能比次臨界還高，但每一種流體所能提升的幅度根據回收熱源皆不盡相同，尤其應用在熱源溫度較高的情形下，使用超臨界循環更加能夠發揮其優勢。

本實驗完成全系統複循環系統能量利用研究流程，並建立未來各式渦輪發電系統之排氣廢熱利用分析方式參考依據。由本研究得知 SPT5 微型渦輪發電系統經此廢熱利用分析可使系統燃油使用效率用於發電應用其效率可達 24%，較其尚未分析餘熱使用前之發電效率 10.65%有一顯著的效益提升。本研究之複循環系統耗能計價相當於電費 9.5NT./kWh，C30 為 6.9 NT./kWh，於偏遠地區或少數國家已具有其可應用之經濟效益，而台灣地區則適合發展於緊急用電設備。而最後與 Capstone 公司的產品 C30 比較之後，發現本研究之複循環系統在初步上已具備有商業化價值的潛力，非常值得後續的系統開發研究與進一步分析。

參考文獻

- [01].McDonald, C. F. and Wilson, D. G., “The Utilization of Recuperated and Regenerated Engine Cycles for High-Efficiency Gas Turbines in the 21st Century,” Applied Thermal Engineering Vol. 16, Nos 8/9, pp. 635-653, 1996.
- [02].Bathie, W. W., “Fundamentals of Gas Turbines—2nd ed.,” John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
- [03].Rodger, C. J., 2000, “25-5 Kwe Microturbine Design Aspects,” ASME Paper 2000-GT-0626, ASME Turbo Expo, Munich, Germany.
- [04].Capstone Turbine Corporation : <http://www.capstoneturbine.com>
- [05].徐士傑，“微型渦輪發電系統配套設計與性能測試”，2008 年。
- [06].莊秉勳，“微型渦輪發電系統之開發”，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，2012 年 7 月。
- [07].Mokhtar Liamini, Hassan Shahriar, Srikar Vengallatore, and Luc G. Frechette, Member, IEEE, Member, ASME, “Design Methodology for a Rankine Microturbine: Thermomechanical Analysis and Material Selection,” Journal of Microelectromechanical system, Vol. 20, No. 1, February 2011.
- [08].Maogang He, Xinxin Zhang, Ke Zeng, Ke Gao, “A combined thermodynamic cycle used

- for waste heat recovery of internal combustion engine” ,Energy, December, 2011
- [09].Basim M. A Makhdoum” An energy and exergy analysis of a microturbine CHP system”
- [10].Pedro J. Mago*,† and Rogelio Luck” Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery from a microturbine using organic Rankine cycles”
- [11].楓祥儀，複合式電動車微渦輪發電系統之研發，2011
- [12].郭啟榮、李毓仁、郭吟翎、徐菘蔚，10 瓦螺桿膨脹機動力之有機朗肯循環機組開發與測試，工業技術研究院，2011
- [13].徐菘蔚、郭啟榮、李毓仁、郭吟翎、張凱涵、王啟川，R245fa 於 ORC 系統中板式蒸發器之熱傳特性分析，工業技術研究院、國立交通大學機械工程學系，2011
- [14].洪祖全，有機朗肯循環系統實驗迴路建立與最佳化設計研究，工程科技通訊一零一期，2009
- [15].Chi-Ron Kuoa, Sung-Wei Hsua, Kai-Han Changb, Chi-Chuan Wangb, “Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system” Energy 36 (2011) 5877 – 5885
- [16].S. Quoilin, M. Orosz, H. Hemond, V. Lemort, “ Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation” Solar Energy 85 (2011) 955 – 966.
- [17].陳信利，矩形鰭片鰭管式熱交換器之熱液動性能研究，2003
- [18].王啟川，簡介製程熱交換節能技術，工研院能環所
- [19].江宜哲，“生質柴油微型渦輪機發電系統性能測試”，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，2006 年 7 月。
- [20].M. Zipperer GmbH, “Lieferprogramm”，Ingenieurburo Cat, Germany, 2012
- [21].台灣中油股份有限公司：<http://www.cpc.com.tw/>

科技部補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現（簡要敘述成果是否有嚴重損及公共利益之發現）或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☒ 已發表 ☐ 未發表之文稿 ☐ 撰寫中 ☐ 無

專利：☐ 已獲得 ☐ 申請中 ☐ 無

技轉：☐ 已技轉 ☐ 洽談中 ☐ 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性），如已有嚴重損及公共利益之發現，請簡述可能損及之相關程度（以 500 字為限）

完成全系統複循環系統能量利用研究流程，並建立未來各式渦輪發電系統之排氣廢熱利用分析方式參考依據。由本研究得知 SPT5 微型渦輪發電系統經此廢熱利用分析可使系統燃油使用效率用於發電應用其效率可達 24%，較其尚未分析餘熱使用前之發電效率（10.65%）有一顯著的效益提升。

經由模擬後發現到超臨界循環之系統效率確實能比次臨界還高，而每一種流體所能提升的幅度皆不盡相同，但整體而言對效率的提升有著明顯的助益，尤其應用在熱源溫度較高的情形下，使用超臨界循環更加能夠發揮其優勢，後續若能繼續往此方向深入研究，將可望使系統回收效率更為提升。

本研究之複循環系統耗能計價相當於電費 9.5NT./kWh，C30 為 6.9 NT./kWh，於偏遠地區或少數國家已具有其可應用之經濟效益，而台灣地區則適合發展於緊急用電設備。而最後與 Capstone 公司的產品 C30 比較之後，發現本研究之複循環系統在初步上已具備有商業化價值的潛力，非常值得後續的系統開發研究與進一步分析。

科技部補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期：103 年 10 月 1 日

科技部補助計畫	計畫名稱：微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究 計畫主持人：蔣小偉 計畫編號：102-2221-E-007-088 領域：能源		
研發成果名稱	(中文) 微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究		
	(英文) Combined Cycle Study Using Organic Rankine Cycle and 9KW Micro-turbine		
成果歸屬機構	國立清華大學動力機械工程學系	發明人 (創作人)	蔣小偉
技術說明	(中文) 本研究乃是引進複循環(Combined Cycle)的設計概念，結合有機朗肯循環(ORC)，利用氣渦輪機(GT)運轉時排放高溫廢熱的特性，驅動 ORC 進行發電，目的為建立一微型有機朗肯與 9KW 氣渦輪機複循環系統。此系統主要利用 GT 發電系統中所產生的廢熱作為熱源，驅動有機朗肯循環之發電系統，進而使 GT 發電系統的廢熱能夠進行二次的應用，以提供額外的發電能力，完成複循環發電系統，並有效提高整體效率。 有機朗肯循環之效率雖不及蒸氣朗肯循環，但其可同時回收不同溫度的熱源，其溫度需求亦較低，除了回收引擎廢氣之外，也可同時應用於太陽能、地熱或工業廢熱等，只需將各熱源之溫度與熱交換方式做一完善分析，即可實現一應用於多重熱源的熱回收系統。		
	(英文) The study is imported the design concept of combined cycle with Organic Rankine Cycle (ORC) which use the feature of high temperature waste heat of Gas Turbine (GT) operating to trigger ORC to generate power. We aim to build a Organic Rankine (ORC) and 9kW Gas Turbine (GT) Cycle. The cycle mainly use power generation system of GT producing waste heat as heat source to trigger ORC power generation system. It can reuse the waste heat of GT power generation system to generate additional power and complete our combined cycle power generation system. Also, it can improve the efficiency of entire system. Though the efficiency of ORC is less than Rankine Cycle , it can recover heat sources of different temperature at same time. Its requirement of temperature is also less than Rankine Cycle. It can not only recover the waste heat of engine but also can apply on solar, terrestrial heat and industrial waste heat. We just need to analysis the temperature of each heat source and heat exchange completely ,then we can achieve a heat recovery system used in multiple heat sources.		
產業別	電力供應業、熱力供應業		

技術/產品應用範圍	工業廢熱發電、地熱發電
技術移轉可行性及預期效益	若將本研究設計之有機朗肯複循環系統用於 Capstone 公司所生產之 C30 氣渦輪機上可將輸出功由 30KW 提升至 39.2KW，提升整體效率 9.2%。證明其複循環設計對於渦輪廢熱回收所帶來之性能提升和經濟效益。

註：本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

科技部補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2014/08/06

科技部補助計畫	計畫名稱：微型有機朗肯(ORC)與9kW氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究	
	計畫主持人：蔣小偉	
	計畫編號：102-2221-E-007-088-	學門領域：能源節約
無研發成果推廣資料		

102 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：蔣小偉			計畫編號：102-2221-E-007-088-				
計畫名稱：微型有機朗肯(ORC)與 9kW 氣渦輪機(GT)複循環(Combined Cycle)之性能分析與測試研究							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	1	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	1	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	1	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	無
---	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與（閱聽）人數	0	

科技部補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☒ 已發表 ☐ 未發表之文稿 ☐ 撰寫中 ☐ 無

專利：☐ 已獲得 ☒ 申請中 ☐ 無

技轉：☐ 已技轉 ☒ 洽談中 ☐ 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

完成全系統複循環系統能量利用研究流程，並建立未來各式渦輪發電系統之排氣廢熱利用分析方式參考依據。由本研究得知 SPT5 微型渦輪發電系統經此廢熱利用分析可使系統燃油使用效率用於發電應用其效率可達 24%，較其尚未分析餘熱使用前之發電效率(10.65%)有一顯著的效益提升。

經由模擬後發現到超臨界循環之系統效率確實能比次臨界還高，而每一種流體所能提升的幅度皆不盡相同，但整體而言對效率的提升有著明顯的助益，尤其應用在熱源溫度較高的情形下，使用超臨界循環更加能夠發揮其優勢，後續若能繼續往此方向深入研究，將可望使系統回收效率更為提升。

本研究之複循環系統耗能計價相當於電費 9.5NT./kWh，C30 為 6.9 NT./kWh，於偏遠地區或少數國家已具有其可應用之經濟效益，而台灣地區則適合發展於緊急用電設備。而最後與 Capstone 公司的產品 C30 比較之後，發現本研究之複循環系統在初步上已具備有商業化價值的潛力，非常值得後續的系統開發研究與進一步分析。