

以基因演算法優化低溫熱源卡琳娜循環發電效率

楊文豪¹ 林明諠¹ 施威宏² 劉宗鑫² 吳文傑² 陳玉彬^{3*}

摘 要

工業廢熱、生質熱、地熱與太陽熱能等，均屬於低溫熱能，因其轉換電能效率不高，常常被浪費掉。若能提升轉換效率，將能減少臺灣對其他能源的依賴，亦可減少溫室氣體排放與空氣汙染。由於中低溫熱源溫度、發電系統工作元件的熱效率、環境條件等皆不盡相同，常用來提升發電效率的方式為將不同種熱力循環銜接，透過循環中不同的工作流體，提升發電效率，卻因此增加可變參數的範圍、數量及優化的複雜程度。本研究為了能夠系統性解決多參數優化問題，結合最佳化理論與熱力性質資料庫以撰寫程式，在已知參數(膨脹機入口壓力、熱源溫度、工作流體濃度)範圍內，優化常見之低溫熱源發電循環(卡琳娜循環)，以提升發電效率。本研究先將上述熱力循環建立成數值化的熱力模型，重現前人文獻結果，以此實證該熱力模型之準確性，接著，模型中結合自行撰寫之基因演算法程式碼，分別優化熱力模型之重要參數。最終獲得一組最佳化參數，使卡琳娜循環所得之最佳發電效率為14.652%。本研究結果證明基因演算法能有效解決多重參數優化問題，且幫助設計循環系統取得最佳效率。

關鍵詞：低溫熱源發電，氨水，卡琳娜循環，基因演算法，熱效率

1. 前 言

由於世界各國對能源的需求急遽增加，人類為了取得能源，燃燒煤礦、石油與天然氣等化石燃料，這些燃料雖然讓人們生活更加便利，卻大量製造二氧化碳，促進全球暖化。近年來全球暖化伴隨的氣候變遷為人類及環境帶來種種災難(Root *et al.*, 2003)，我們已經耳熟能詳極端氣候，像是冰川融化、永久凍土層融化、珊瑚礁死亡、海平面上升、生態系統改變、洪水乾旱的災害增加、致命熱浪等等。為了有效遏止全球暖化，除了節能減碳及開發替代能源之外，目前最重要的是採取更有效的方

法回收廢熱，提升能源使用效率，減少能源浪費。

近年來臺灣的地熱發電發展比其他國家相比相對落後，例如：日本(Sato *et al.*, 2015)、菲律賓(Bertani, 2016)、冰島(Whittaker, 2009)、墨西哥(Pan *et al.*, 2016)等國家。臺灣與前述國家皆身處火山帶，因而蘊藏著豐富的地熱能，若能妥善利用，相信未來能夠減少臺灣火力發電的占比，進而減少溫室氣體排放。

蔡佩君等在2011年的區域能源整合調查與策略建議報告裡提到，臺灣工業廢熱約64%屬於低溫廢熱(<200°C)，由於低溫廢熱(<250°C空氣或<100°C熱水)通常在散熱後排放至環境，造

¹國立清華大學動力機械工程學系 碩士生

²財團法人金屬工業研究發展中心 研究員

³國立清華大學動力機械工程學系 教授

*通訊作者電話: 03-5715131#33767, E-mail: ybchen@pme.nthu.edu.tw

收到日期: 2020年03月11日

修正日期: 2020年06月20日

接受日期: 2020年07月30日

成環境溫度上升，如果能把它用來發電，將能降低對環境的汙染(蔡佩君等，2011)。

為了有效利用低溫熱能，學者提出雙循環系統(Binary cycle system)來發電，此系統常被利用在低溫廢熱及地熱發電等領域(DiPippo, 2004；Yari, 2010；Aneke *et al.*, 2011)。本研究將熱源溫度設定在常見的低溫熱源溫度附近(90°C-120°C)，進行後續雙循環系統之參數分析。

雙循環系統依工作流體不同可分為有機朗肯循環及卡琳娜循環，有機朗肯循環的工作流體為低沸點有機溶劑，卡琳娜循環的工作流體為氨水混和溶液(Kalina, 1984)。Zhang *et al.* (2012)整理了1900到1990年代，卡琳娜循環發展史。多位學者對此兩種循環進行分析比較，並比較何者更適合用來發電(Bombarda *et al.*, 2010；Rodríguez *et al.*, 2013)，從後者文獻來說，在巴西的環境條件下，卡琳娜循環發電量比朗肯循環多18%。卡琳娜循環與有機朗肯循環相比，通常參數更多且更為複雜外，很多文章也對複雜的參數進行了分析(Lolos and Rogdakis, 2009；Wang *et al.*, 2013a；Ghaebi *et al.*, 2018)，但能參與分析之參數有限。Fallah *et al.* (2016)發現藉由調整卡琳娜循環各部件的參數，將可提高熱效率，該團隊調整參數的優先順序由高至低分別為冷凝器、渦輪機和蒸發器。

近年來相關的文獻中，人工智慧演算法(Artificial Intelligence, AI)被廣泛運用在求解這類熱力循環的參數優化的問題(Clarke *et al.*, 2014；Clarke and McLeskey Jr., 2015；Imran *et al.*, 2015；Modi and Haglind, 2015)。Clarke *et al.* (2014)比較了基因演算法與粒子群演算法的優劣，兩種方法都能夠找到接近最佳解的答案，但在相同條件下基因演算法較快收斂，而粒子群演算法接近最佳解的粒子數較多，兩者各有優劣。Wang *et al.* (2013b)利用基因演算法，優化一套利用太陽能發電的低溫發電系統，提供本研究建立卡琳娜熱力模型的參考。

學者Saffari *et al.* (2016)利用人工蜂群法，最佳化一套卡琳娜循環。

優化熱力循環發電系統時，通常包含許多複雜的參數，例如：渦輪機入口壓力或溫度、工作流體濃度等。藉由調整循環中多種參數，可使發電系統達到最佳效能。前人的研究中往往是以銜接不同循環的方式來提升熱效率，只有單一循環時，可能可以利用參數分析來達到提升效率的目的，但將兩個甚至三個循環銜接在一起時，可調控的參數變多，分析過程將會變得更加複雜。在多參數分析同時，一次調整單一參數容易失之偏頗；一次調整多個參數的話則費時費工，也欠缺系統化嘗試與分析。本研究最終採用基因演算法，利用其收斂較快速的特性，可系統化解此類多種參數優化問題。

2. 熱力循環系統

目前世界上常見的低溫熱源發電循環有兩種，分別為有機朗肯循環與卡琳娜循環。這兩種循環都是針對低溫熱源進行發電，廣泛地應用於工業餘熱發電(Tian and Shu, 2017)、地熱發電(Spadacini *et al.*, 2017)、太陽能發電(Wang *et al.*, 2013b)、生質熱發電(Strzalka *et al.*, 2010)等領域。相較於有機朗肯循環，卡琳娜循環在蒸發與冷凝過程中的熱散失較小，於低溫熱源下有較高的熱效率。卡琳娜循環工作流體為氨水混和溶液，其特點為透過適當調整氨與水的比例，使工作流體的泡點溫度與露點溫度改變，能夠搭配不同溫度熱源達到最高的熱效率。

圖1為卡琳娜循環示意圖以及循環各過程之溫熵圖。卡琳娜循環由八種元件所組成：蒸發器(Evaporator)、渦輪機(Turbine)、冷凝器(Condenser)、泵(Pump)、液氣分離器(Separator)、高溫與低溫再熱器(High-temperature reheat exchanger、Low-temperature reheat exchanger)、膨脹閥(Valve)以及吸收器(Absorber)。

卡琳娜循環的過程如下：

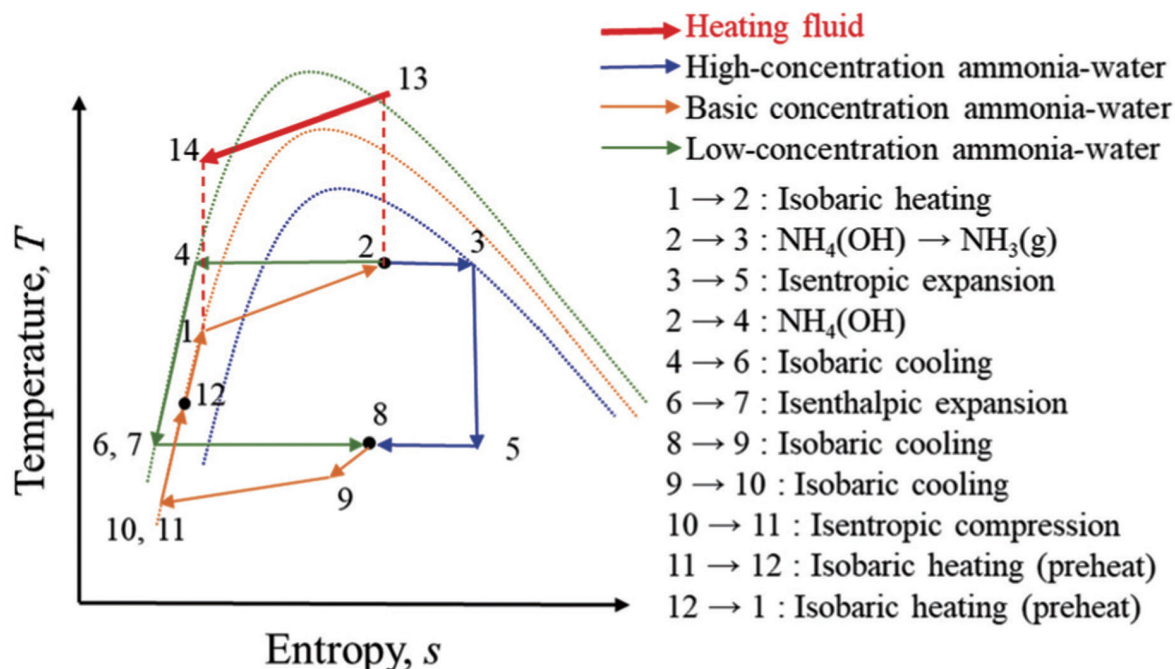
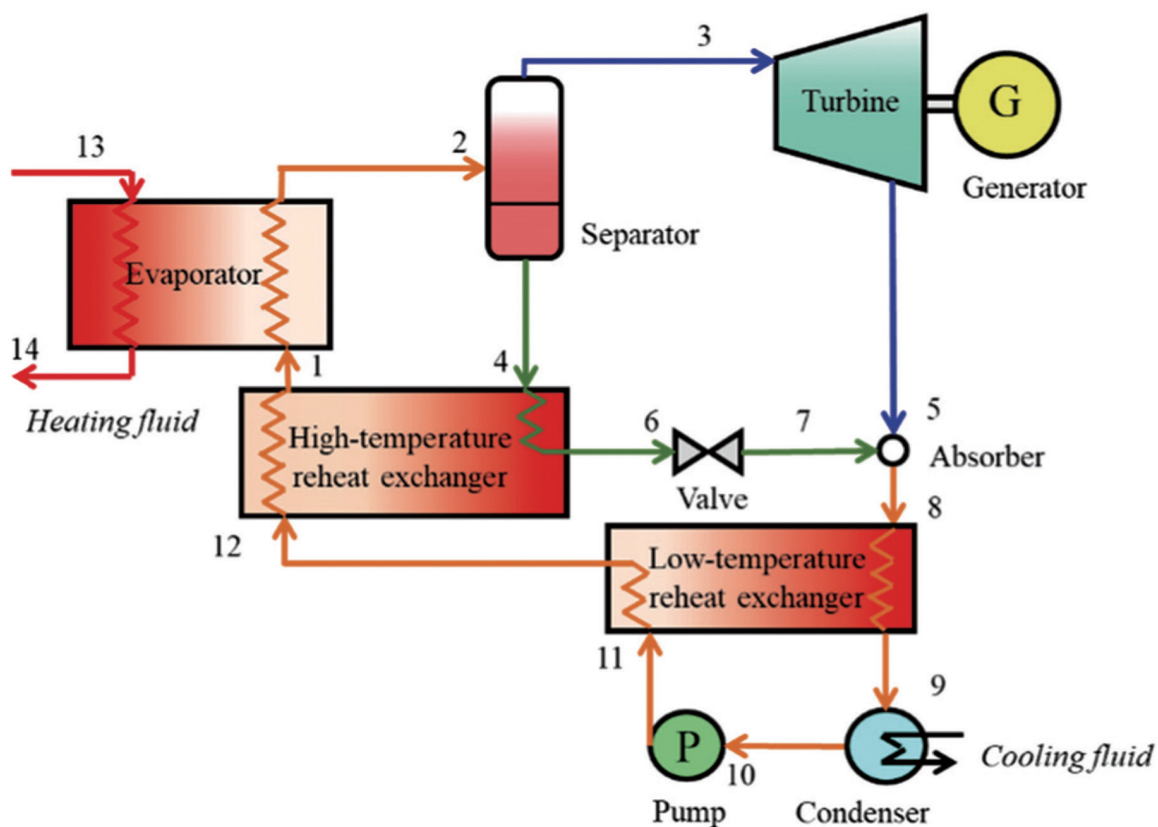


圖1 卡琳娜循環：(a)示意圖；(b)溫熵(T - s)圖及循環之各過程(本研究繪製)

工作流體在蒸發器中從低溫熱源處吸熱，部分液體蒸發為氣態，經液氣分離器分離不同相的氨水溶液，一部分是高溫高壓的飽和氨蒸

氣進入渦輪機，推動渦輪機作功產生電力且氣體膨脹降壓；另一部分是尚有餘溫的氨水溶液進入高溫再熱器中，輸出部分熱能為即將進入

蒸發器前的工作流體預熱，此時工作流體經膨脹閥膨脹降壓，在吸收器匯流兩邊的流體，經低溫再熱器進行二次預熱，高溫工作流體進入冷凝器放出熱量，在泵處輸入功使流體升壓，完成一次系統內部循環。

以下為與計算卡琳娜循環效能基準相關之數學模型。其中 \dot{m} 為流體的質量流率(kg/s)， h 為流體的焓值(kJ/kg)， η 為熱效率， \dot{W} 為功率(kW)， \dot{Q} 為熱流率(kW)；符號的下標為各狀態點的代號， t 代表渦輪機， e 代表蒸發器， p 代表泵。

蒸發器的能量守恆可表示為：

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (1)$$

渦輪機輸出功可表示為：

$$\dot{W}_t = \dot{m}_3(h_3 - h_5) \quad (2)$$

泵輸入功可表示為：

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10}) \quad (3)$$

循環總輸出功可定義為：

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (4)$$

循環之熱效率為：

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_e} \quad (5)$$

本研究欲優化對象為卡琳娜循環熱效率

(η_{net})，當調整膨脹機入口壓力、熱源溫度、工作流體濃度等參數會改變蒸發器輸入熱(\dot{Q}_e)、渦輪機輸出功(\dot{W}_t)與泵輸入功(\dot{W}_p)的大小，從式5可知，上述三個參數會影響到熱效率大小。所以本研究將針對膨脹機入口壓力、熱源溫度與工作流體濃度進行優化，在優化多變數參數前，首先要建立一個數值模型。

3. 數值模型建立

本研究採用之優化理論基礎為基因演算法，它是由 John Holland 在 60 年代中期提出 (Chacartegui *et al.*, 2009)，各問題被視為染色體，模仿生物圈進化的選擇、交配和突變等過程，隨著世代的演化讓族群表現更佳。

本研究利用 MATLAB (MATrix LABoratory) 軟體撰寫基因演算法程式，為了驗證程式是否具備最佳化能力而不會陷入區域最佳解，選擇了基準函數 Rastrigin function 作為範例，此函數可在許多文獻中找到 (Neri and Tirronen, 2010；Price *et al.*, 2006)，函數表示式如式 6。

$$f = \sum_{j=1}^{N_{dim}} [x_j^2 - 10 \cos(2\pi x_j) + 10] \quad (6)$$

其中 $-5.12 \leq x_j \leq 5.12$ ， N_{dim} 表示函數的維度。

圖 2 為 Rastrigin function 等高線圖，可以看出這個函數有許多局部最小值，若基因演算法

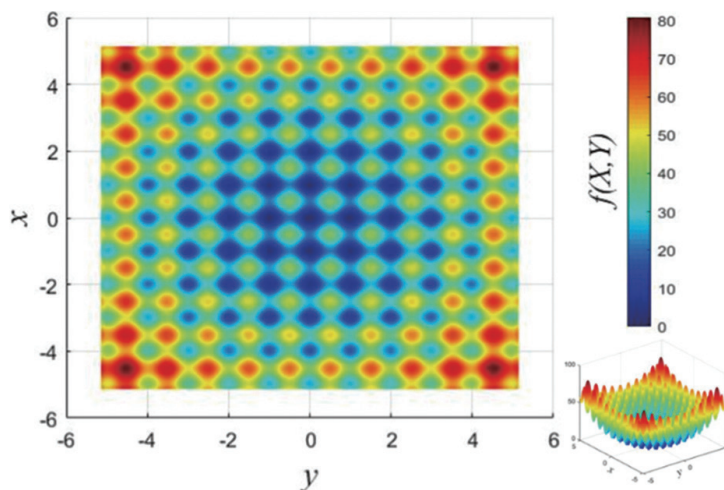


圖2 Rastrigin function等高線圖(本研究繪製)

的突變過程沒有正常運作，很容易讓演化過程陷入區域最小值。本研究求解答案為此函數的全域最小值，在 $x = y = 0$ 時，函數解為0，與正確解相同。

若考慮現實環境所限制的條件下，要得到熱力循環的最佳效率，我們就需要透過最佳化方法設計，才能優化循環效率。現實環境條件有：熱源溫度、渦輪機入口壓力、工作流體濃度…等，通常是多參數同時存在，而基因演算法很適合解這種多參數的優化問題。以下將介紹本研究所撰寫之參數優化步驟。

首先，必須先設定基因演算法之演化參數，例如：子代數、菁英子代數、交配率、突

變率、欲優化參數之搜尋範圍、最大世代數等等。接著如圖3所示進入優化程式的各流程：

- (a) 以隨機方式產生多條染色體作為初始族群；
- (b) 將初始族群的染色體的變數值帶入EES (Engineering Equation Solver, EES)軟體計算出適應值，適應值為前述熱力模型計算出的熱效率(η_{net})；
- (c) 選出並保留適應值較大的菁英子代個數，捨棄其餘的染色體；
- (d) 補充染色體數量使族群數保持不變；
- (e) 再次計算各染色體適應值，即熱效率(η_{net})；
- (f) 篩選族群中較佳個體組成下一代族群，本研究使用的是輪盤選擇法(Roulette wheel

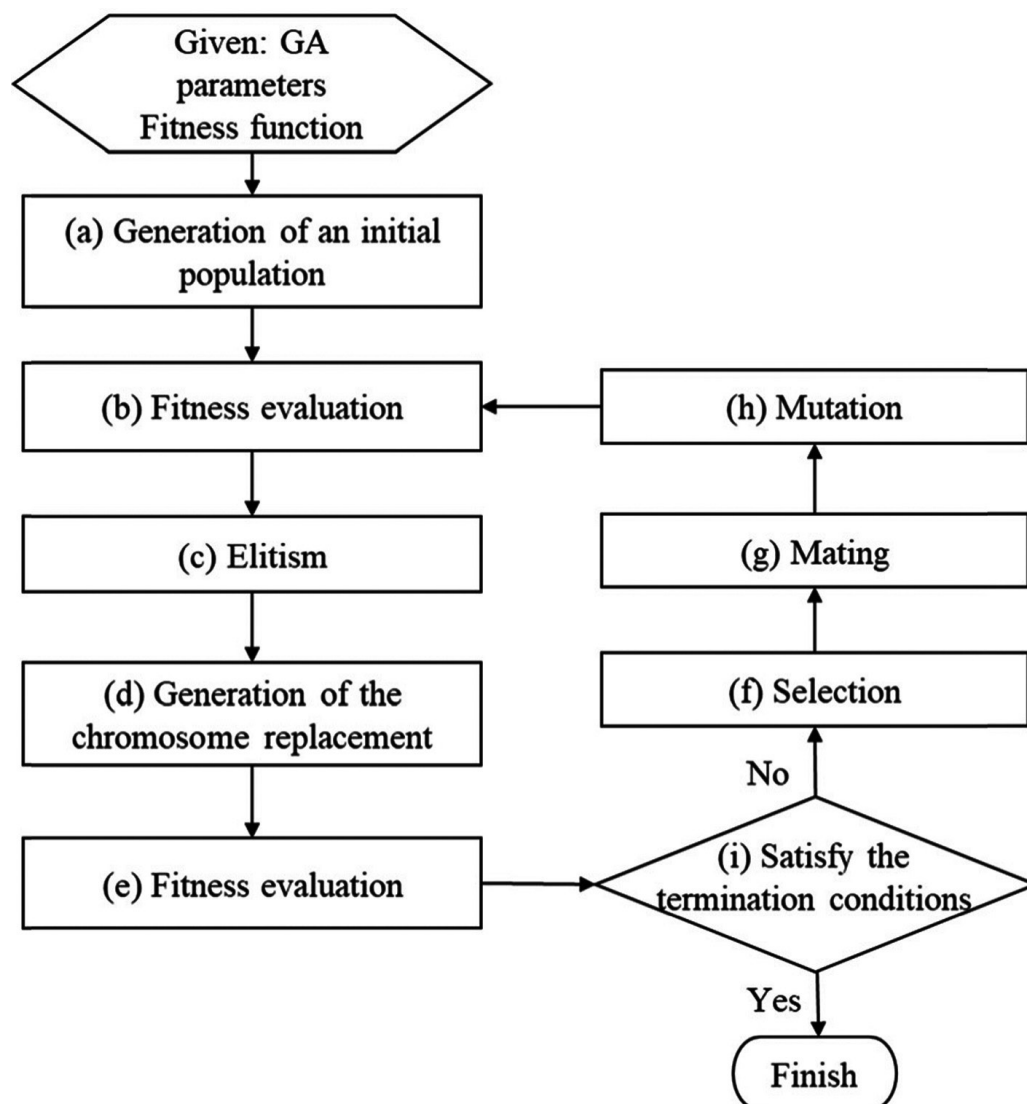


圖3 基因演算法參數最佳化熱力系統流程圖(本研究繪製)

selection)；

- (g) 交配為族群中兩兩染色體，互相交換一段基因，本研究使用的是均勻交換(Uniform crossover)；
- (h) 染色體上基因進行突變，能夠讓搜尋點更加分散，避免過早收斂在局部最佳解；
- (i) 當程式滿足收斂條件時，則停止程式並將結果輸出，收斂條件可設為當最佳適應值連續3次變動幅度極小(本研究設定變動量 $<10^{-5}\%$ 或是0.00001%)，或滿足最大世代數(本研究設定為最大世代數60次)等等。本研究利用此系統優化熱力循環之最佳熱效率，結果將在下章節呈現。

4. 結果與討論

透過整合熱力模型及基因演算法本研究可以系統地得到多種參數優化結果，研究結果之驗證步驟如下：

- i. 建立熱力模型，並與文獻比較結果，確認熱

力模型之可信度。

- ii. 參數分析，透過調整欲優化之參數，此過程得知調整單一參數時，熱效率的趨勢。
- iii. 利用基因演算法優化程式，與參數分析之結果比對，驗證程式的優化結果是否合理。

4.1 模型驗證

圖4為熱源溫度在363 K的條件下，不同渦輪機壓力值隨氨水溶液濃度比例增加時，熱效率的變化關係圖。此張圖所要呈現的是與Hettiarachchi *et al.* (2007)在相同環境條件下，模擬所得之結果，可發現兩者有相似的趨勢，本研究結果的整體熱效率值略小於文獻，但兩者之間差距不超過2%，因此可以相信此熱力模型具有一定的可信度。以此為欲研究之熱力模型，進行參數優化分析。

4.2 參數分析

圖5為熱源溫度在393 K的條件下，分析渦輪機在不同壓力且在不同氨水溶液濃度比例下

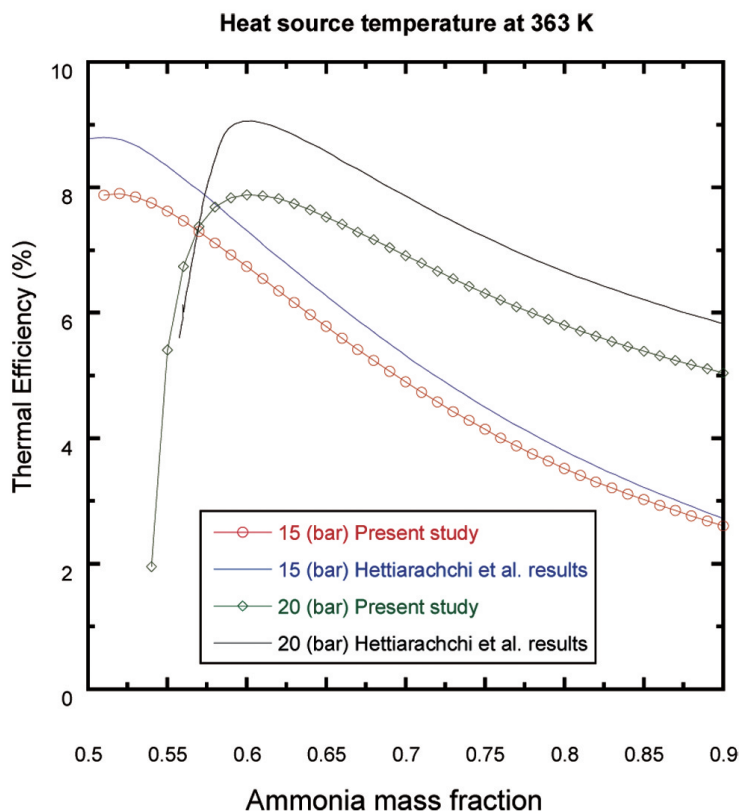


圖4 比較與Hettiarachchi *et al.* (2007)之熱效率(本研究繪製)

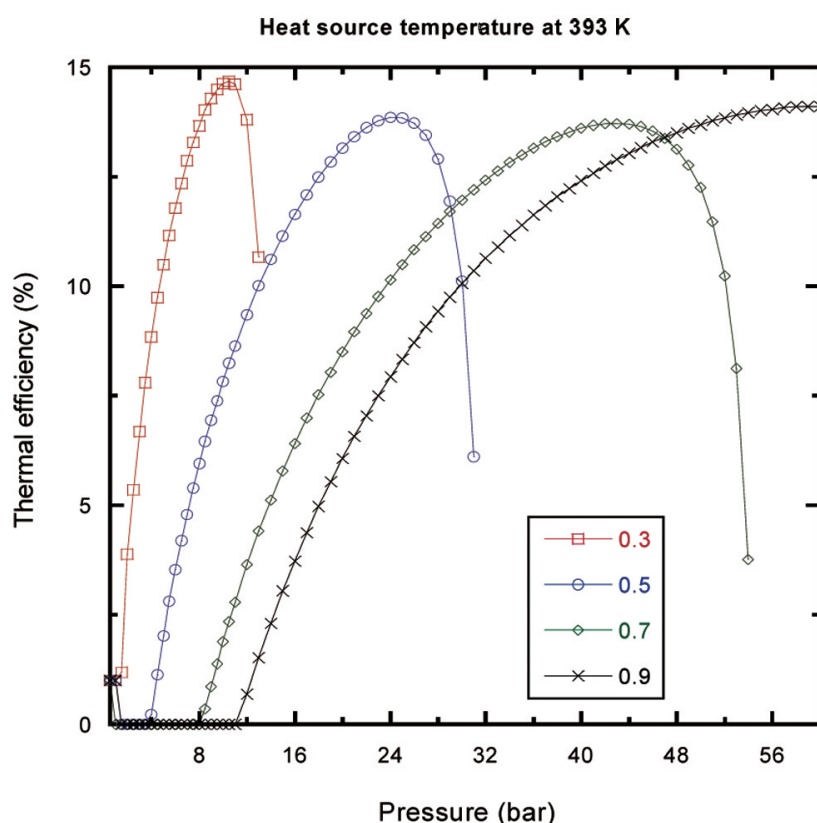


圖5 渦輪機在不同壓力且在氨水溶液濃度比例下與熱效率相對應關係圖(本研究繪製)

與熱效率相對應的關係圖。參與探討之氨水溶液濃度比例共有0.3、0.5、0.7、0.9共四組。在固定濃度條件下，逐漸增加渦輪機壓力，熱效率會隨之上升直到最高點，此時繼續增加壓力時熱效率會開始下降，所以圖中會出現一個熱效率的波峰。接著比較不同的氨水溶液濃度對熱效率的影響，可發現隨濃度增加熱效率最大值所對應的壓力也越大，而濃度0.3與0.9熱效率最大值會大於濃度0.5與0.7的曲線。

圖6(a)-(c)為渦輪機分別在不同渦輪機入口壓力條件下，分析不同氨水溶液濃度比例在不同熱源溫度下與熱效率對應之關係圖。圖6(a)中在相同熱源溫度條件下，逐漸增加氨水溶液濃度比例，熱效率會隨之上升直到最高點，但繼續增加濃度比例時熱效率開始下降，所以看圖中會有一個個熱效率的波峰。

在調整不同的熱源溫度從373至393 K時可以發現，越高的熱源溫度會有越大的熱效率峰值，但所對應的濃度比例會降低。在工作流體

濃度具有可調性之熱力循環中，濃度會是一個關鍵的參數，因為高濃度的工作流體或許能夠提升熱效率，但也會造成輸入功的增加。比較圖6(a)(b)或(b)(c)可以發現，在不同渦輪機入口壓力條件下，整體熱效率分布趨勢會隨著壓力變大而向氨水濃度較高的地方移動。

在熱源溫度不穩定時，氨水混合溶液可調控濃度比例，進一步改變工作流體沸點是不容忽視的特性。越高的熱源溫度會有越大的熱效率峰值，但所對應的濃度比例會越低。

4.3 最佳化結果

因此，本研究將利用自行撰寫的基因演算法程式碼，針對熱源溫度、渦輪機入口壓力及氨水溶液濃度比例此三者為欲研究的變數，目標為獲得熱效率的最大值。表1及表2為基因演算法之參數設定及卡琳娜循環之環境條件。

本研究是以低階熱能為目標進行優化，如適合用來發電的高溫地熱出口溫度常在90°C以

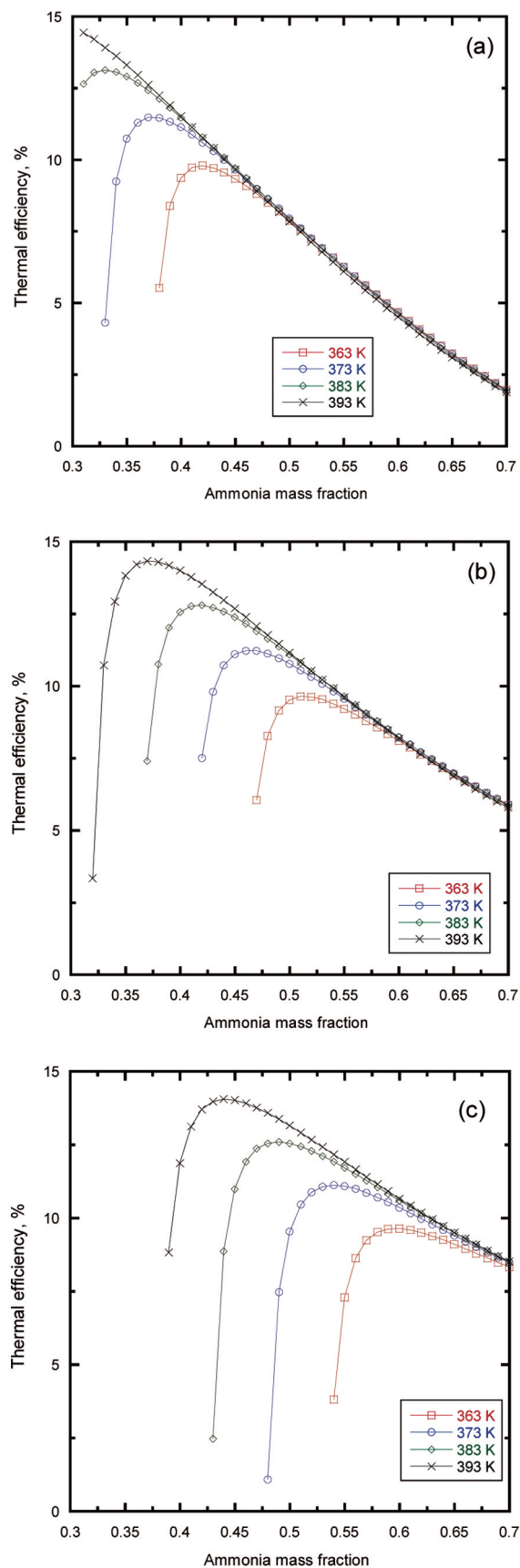


圖6 分析在不同熱源溫度下氨水溶液濃度比例與熱效率的關係圖：(a) 10 bar；(b) 15 bar；(c) 20 bar (本研究繪製)

表1 基因演算法之參數設定(本研究整理)

參數	值
族群數量	50
交配率	0.7
突變率	0.08
熱源溫度範圍(K)	363 - 393
渦輪機入口壓力範圍(bar)	0.5 - 60
氨水溶液濃度比例	0.3 - 0.9
菁英子代數	20
終止世代數	60

表2 卡琳娜循環之環境條件(本研究整理)

工作流體	氨水混和溶液
環境溫度(K)	298.15
環境壓力(bar)	1.0135
渦輪機等熵效率	0.8
泵等熵效率	0.7
蒸發器夾點溫度差(K)	2
冷凝器溫度(K)	303.15

上，因此將熱源溫度設定在70°C-100°C (363-393 K)附近。市面上的渦輪機因為材料、設計上等因素，渦輪機機體皆有其能夠承受的最大壓力，不影響工作效率的情況下，從眾多渦輪機規格中整理並設定渦輪機入口壓力範圍上限為60 bar。氨水溶液濃度比例的設定則是根據熱源入口溫度去調整，當越低溫的入口溫度之下，其最佳熱效率會落在越高氨水濃度比例，因此為提高程式計算效率與節省，將氨水濃度比例設定在0.3-0.9之間。

最佳化結果如表3所示，當渦輪機入口壓力、熱源溫度及氨水溶液濃度比例分別為10.37

表3 卡琳娜循環之最佳化結果(本研究整理)

參數	值
熱源溫度(K)	393
渦輪機入口壓力(bar)	10.37
氨水溶液濃度比例	0.30
熱效率(%)	14.652

bar、393 K、0.3時會有最佳熱效率14.652%。與參數分析所得出的結果，趨勢吻合。此優化結果與優化前相比約提升5.02%。

圖7中可以看到參數的收斂情形，收斂圖

中紅色的點為菁英主義個體，藍色的點為普通的個體，隨演化世代數增加，在演化過程第20次時，菁英主義個體收斂在三個聚落，此現象也與前面參數分析時的結果相吻合，因在不同

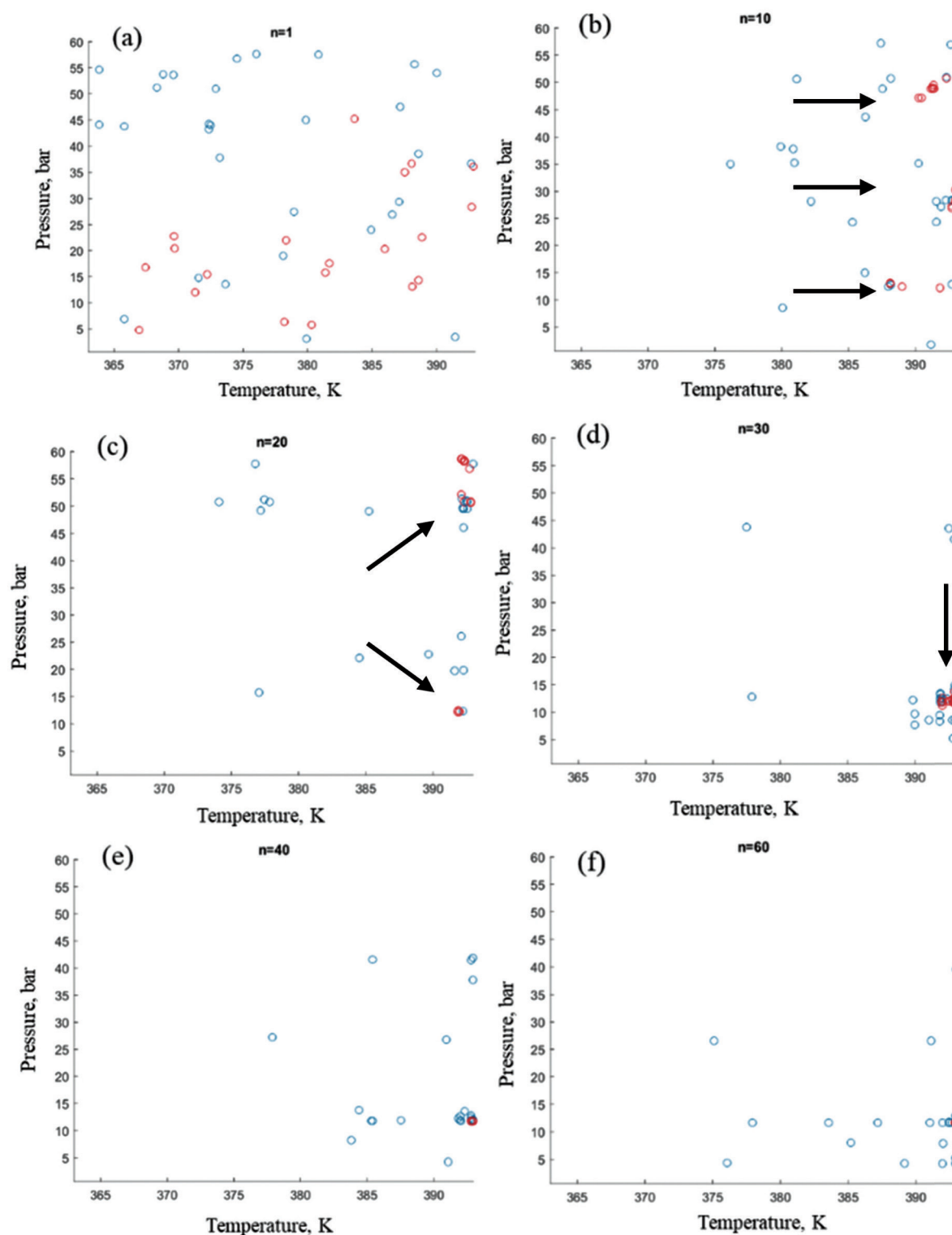


圖7 卡琳娜循環不同演化世代之族群分布圖：(a) 第1代；(b) 第10代；(c) 第20代；(d) 第30代；(e) 第40代；(f) 第60代(本研究繪製)

參數條件下會有不同的熱效率峰值。隨著演化次數至30次時，菁英主義個體已經往最佳化結果方向逐漸收斂於一點，當演化次數大約40次時，所有菁英主義個體完全收斂至一點之上。

5. 結 論

本研究針對低溫熱源發電，建立一套熱效率優化系統。此優化系統利用EES軟體中的熱力性質資料庫與MATLAB撰寫的基因演算法程式做結合，透過簡單方式輸入欲優化參數之範圍，能夠優化不同熱力循環，是目前已知國內第一套能夠用來優化地熱循環之系統。成果已成功建立熱力模型並透過與文獻比對，實證此模型可信度。本研究建立一套能利用基因演算法優化熱力循環的系統，熱效率最佳值也與參數分析結果吻合。此外，透過參數分析結果得知，系統內單一參數的變化並不能預測出熱效率最佳值，熱源溫度、渦輪機入口壓力、工作流體濃度等參數皆會影響熱效率的大小。本研究利用多參數優化後，得到卡琳娜循環最佳熱效率為14.652%。

誌 謝

感謝中華民國科技部(計畫編號：108-2622-E-007-006-CC2, 106-2628-E-007-006-MY3, 108-2218-E-007-009)及能源局計畫(計畫編號：108-D0101-3)經費支持。另行致謝財團法人金屬工業研究發展中心之協助。

參考文獻

蔡佩君、黃釋緯與馬公勉，2011。區域能源整合調查與策略建議，臺灣經濟研究院研究分析報告，2011。

Aneke, M., B. Agnew and C. Underwood, 2011. "Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant," *Applied Thermal*

Engineering, vol. 31, no. 10, pp. 1825-1832, 2011.

Bertani, R., 2016. "Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report," *Geothermics*, vol. 60, pp. 31-43, 2016.

Bombarda, P., C. M. Invernizzi and C. Pietra, 2010. "Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles," *Applied thermal engineering*, vol. 30, no. 2-3, pp. 212-219, 2010.

Chacartegui, R., D. Sánchez, J. Muñoz and T. Sánchez, 2009. "Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants," *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2162-2170, 2009.

Clarke, J., L. McLay and J. T. McLeskey Jr, 2014. "Comparison of genetic algorithm to particle swarm for constrained simulation-based optimization of a geothermal power plant," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, no. 1, pp. 81-90, 2014.

Clarke, J. and J. T. McLeskey Jr, 2015. "Multi-objective particle swarm optimization of binary geothermal power plants," *Applied energy*, vol. 138, pp. 302-314, 2015.

DiPippo, R., 2004. "Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids," *Geothermics*, vol. 33, no. 5, pp. 565-586, 2004.

Fallah, M., S. M. S. Mahmoudi, M. Yari and R. A. Ghiasi, 2016. "Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system," *Energy Conversion Management*, vol. 108, pp. 190-201, 2016.

Ghaebi, H., T. Parikhani, H. Rostamzadeh and B. Farhang, 2018. "Proposal and assessment of a novel geothermal combined cooling and

- power cycle based on Kalina and ejector refrigeration cycles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 767-781, 2018.
- Hettiarachchi, H. M., M. Golubovic, W. M. Worek and Y. Ikegami, 2007. "The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 129, no. 3, pp. 243-247, 2007.
- Imran, M., M. Usman, B.-S. Park, H.-J. Kim and D.-H. Lee, 2015. "Multi-objective optimization of evaporator of organic Rankine cycle (ORC) for low temperature geothermal heat source," *Applied Thermal Engineering*, vol. 80, pp. 1-9, 2015.
- Kalina, A. I., 1984. "Combined-cycle system with novel bottoming cycle " *Journal of engineering for gas turbines*, vol. 106, no. 4, pp. 737-742, 1984.
- Lolos, P. and E. Rogdakis, 2009. "A Kalina power cycle driven by renewable energy sources," *Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 457-464, 2009.
- Modi, A. and F. Haglind, 2015. "Thermodynamic optimisation and analysis of four Kalina cycle layouts for high temperature applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 76, pp. 196-205, 2015.
- Neri, F. and V. Tirronen, 2010. "Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis," *Artificial Intelligence Review*, vol. 33, no. 1-2, pp. 61-106, 2010.
- Pan, C., O. Chávez, C. E. Romero, E. K. Levy, A. A. Corona and C. Rubio-Maya, 2016. "Heat mining assessment for geothermal reservoirs in Mexico using supercritical CO₂ injection," *Energy*, vol. 102, pp. 148-160, 2016.
- Price, K., R. M. Storn and J. A. Lampinen, 2006. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- Rodríguez, C. E. C., J. C. E. Palacio, O. J. Venturini, E. E. S. Lora, V. M. Cobas, D. M. dos Santos, F. R. L. Dotto and V. Gialluca, 2013. "Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil," *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 109-119, 2013.
- Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig and J. A. Pounds, 2003. "Fingerprints of global warming on wild animals and plants," *Nature*, vol. 421, pp. 57-60, 2003.
- Saffari, H., S. Sadeghi, M. Khoshzat and P. Mehregan, 2016. "Thermodynamic analysis and optimization of a geothermal Kalina cycle system using Artificial Bee Colony algorithm," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 154-167, 2016.
- Sato, M., K. Ohara, K. Ono, Y. Mori, K. Osato, T. Okabe, H. Nakata, N. Yanagisawa and H. Muraoka, 2015. "Development of Micro Grid Kalina Cycle® System—The First Demonstration Plant in Hot Spring Area in Japan," in *Proceedings World Geothermal Congress*, 2015.
- Spadacini, C., L. Xodo and M. Quaia, 2017. "Geothermal energy exploitation with Organic Rankine Cycle technologies," in *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*, ed: Elsevier, 2017, pp. 473-525.
- Strzalka, R., R. Ulbrich and U. Eicker, 2010. "Optimization of combustion process in biomass-fuelled cogeneration plant," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 21, 2010.
- Tian, H. and G. Shu, 2017. "Organic Rankine Cycle systems for large-scale waste heat

- recovery to produce electricity," *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*, ed: Elsevier, 2017, pp. 613-636.
- Wang, J., M. Wang, M. Li, J. Xia and Y. Dai, 2013a. "Multi-objective optimization design of condenser in an organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery using evolutionary algorithm," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 45, pp. 47-54, 2013.
- Wang, J., Z. Yan, E. Zhou and Y. Dai, 2013b. "Parametric analysis and optimization of a Kalina cycle driven by solar energy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, pp. 408-415, 2013.
- Whittaker, P., 2009. "Corrosion in the Kalina cycle: An investigation into corrosion problems at the Kalina cycle geothermal power plant in Húsavík, Iceland," The School for Renewable Energy Science in affiliation with University of Iceland & the University of Akureyri, 2009.
- Yari, M., 2010. "Exergetic analysis of various types of geothermal power plants," *Renewable energy*, vol. 35, pp. 112-121, 2010.
- Zhang, X., M. He and Y. Zhang, 2012. "A review of research on the Kalina cycle," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, pp. 5309-5318, 2012.

Optimization Kalina Cycle for Power Generation Efficiency Using Genetic Algorithm

Wun-Hao Yang¹ Ming-Yi Lin¹ Wei-Hung Shih²
Zong-Sin Liou² Wun-Jie Wu² Yu-Bin Chen^{3*}

ABSTRACT

Industrial waste heat, biomass heat, geothermal heat, and solar thermal energy belong to low-temperature thermal energy resources. They were rarely used for power generation in the past and were completely wasted due to their low power conversion efficiency. However, their utilization can reduce the proportion of thermal power generation in Taiwan if the power generation efficiency can be enlarged. The utilization can even further reduce greenhouse gas emissions and air pollution. Because the temperature of the medium and low temperature heat source, the thermal efficiency of the working elements of the power generation system, and environmental conditions are all different, the commonly used way to improve the power generation efficiency is to connect different types of thermal cycles to improve the power generation efficiency through different working fluids in the cycle. However, it will increase the scope, number and complexity of variable parameters. In order to systematically solve the multi-parameter optimization problem, this study combined the optimization theory with the thermal properties database to write a program. It will optimize the common low-temperature heat source power generation cycle (Kalina cycle) within the known parameters (expander inlet pressure, temperature, working fluid concentration) to improve power generation efficiency. In this study, the above thermal cycle is first established into a numerical thermal model, which reproduces the results of previous literature to verify the accuracy of the thermal model. Then, the model is combined with a self-written genetic algorithm code to optimize the important parameters of thermal model. Finally, a set of optimized parameters is obtained, so that the optimal power generation efficiency obtained by the Kalina cycle is 14.652%. The results of this research prove that the genetic algorithm can effectively solve the multi-parameter optimization problem and help design the cycle system to achieve the best efficiency.

Keywords: low-temperature heat source power generation, ammonia solution, Kalina cycle, genetic algorithm, thermal efficiency.

¹ Graduate student, Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University (NTHU).

² Researcher, Department of Metal Industries Research & Development Centre.

³ Professor, Department of Power Mechanical Engineering, NTHU.

* Corresponding Author, Phone: +886-3-5715131#33767, E-mail: ybchen@pme.nthu.edu.tw

Received Date: March 11, 2020

Revised Date: June 20, 2020

Accepted Date: July 30, 2020