

Optimal Design of the External-heating Gasifier based on Waste Energy Recycling

Yu-Chang Yen , Chung-Neng Huang *

Graduate Institute of Mechatronic System Engineering
National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

*E-mail: kosono@mail.nutn.edu.tw

Abstract

Nowadays, how to improve the energy efficiency has become one of the important issues to environmental protection. Hydrogen with high combustion efficiency and zero emission is expected to be the solution for above issue. In general, gasifiers are often used to be the transformers to generate hydrogen from the cheap fuel such as coal and biomass etc.. However, the exhaust gas CO_x is also discharging during hydrogen generation. In this paper, a hybrid system which can simultaneously minimize the CO_x emission of gasifier and relieve the thermal pollution of fuel cells (e.g. SOFC) is proposed. In order to optimize the heat recycling efficiency for the proposed system, first, the external-heating gasifier is design. Next, the Taguchi's method is used to find out the important factors which mostly affect the heat exchanging efficiency. Finally, the multiple ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) is adopted to serve the multi-object problem to obtain the optimal parameters for the design. The simulation results shows that to compare with the existed gasifier there about 53% of efficiency improvement can be achieved by the optimized system. Consequently, it corroborated that this system is not only can improve the energy efficiency, but also can relieve the CO_x gas emission as well as the thermal pollution problem.

Keywords: Optimal Design, Gasifier, Waste Energy Recycling



* Corresponding author:kosono@mail.nutn.edu.tw

DOI : 10.6159/IJSE.2017.(7-2).02

以回收廢熱為目的之外加熱型汽化器的最佳化設計

顏佑璋、黃崇能*

國立臺南大學機電系統工程研究所及工程科技研究所

摘要

目前，如何提高能源使用效率已成為環保工作的重要課題之一。具有高燃燒效率及零排放的氫氣將可以解決目前環境問題。一般來說，氣化器常被當成以煤及生物質等廉價燃料中生產氫氣，在生產氫氣的過程中會產生 CO_x 但同時也可以用來發電。本文提出一種混和系統能降低氣化器對於 CO_x 的排放量，並減輕燃料電池(例如 SOFC)所造成的熱污染。為了最佳化系統的熱回收效率，先設計出外部加熱熱式氣化器，並以田口方法找出影響熱交換效率的重要因子，最後利用多重 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)來解決多目標輸出的問題，並得到最佳參數。模擬結果中證明與現有的氣化器相比，最佳化受系統效率提高的 53% 左右。因此證明此系統不僅可以提高能源使用效率，且可以降低 CO_x 氣體排放及熱污染的問題。

關鍵字:最佳化設計、氣化器、廢熱回收



1. 前言

能源是經濟發展的重要支柱，受到石化能源短缺、全球暖化以及環保意識抬頭的影響，系統效率及可回收利用率在近年來，已受到各國的密切關注[1]。由於氫是一種乾淨、高效、具永續性的能源，故其以新能源之姿迅速躍上國際舞台。但由於以石化燃料來產氫的過程中會產生 COx, 等廢棄物，此缺點將抵銷氫能的優勢，故近年來各國無不致力於產氫技術的突破，以確保氫能的優勢。目前生產氫氣的方式很多；如 Rabi Ibrahim Raby 等人[2]利用太陽能發電產生的直流電及，電解水產生氫氣。Dariusz Czyłkowski 等人[3]將甲烷與蒸氣通過微波等離子體技術合成氫氣。Ceyhan Yilmaz 等人[4]利用地熱能發電所產生的電力來電解經熱發電進行預熱的熱水。Ao Xia 等人[5]利用半乳糖在被厭氧發酵細菌發酵產生氫氣。Yasushi Nishida 等人[6]利用等離子在高壓下放電產生的高溫在分解甲烷或丙烷產生氫氣。上述方式雖然能生產氫氣，但要倚賴太陽能的無法持續產氫、要使用離子合成技術的則需要相當高的溫度、利用地熱發電的需要相當高的壓力、透過生物發酵進行產氫的需要良好的環境控制及高壓等離子放電高溫。但由上述產氫技術中可以發現在不同產氫的過程中，溫度為一重要的共同因素。

由於氣化器是一種以低成本燃料來製氫的方式，其可自煤或生質燃燒裂解出合成氣，再將其中的氫氣提取出來。長年來氣化器已在許多產煤國如：中國、俄羅斯等大量使用，以將便宜的煤轉換成高價的氫。當前利用氣化器產氫的研究如：Muflih A. Adnan[7]等人使用改良式 Aspen Plus 氣化器減少燃燒區所產生的焦油，使用氧氣及蒸汽提升了氫的產量。Min-Hwan Cho[8]等人使用 Ca 添加物(包含牡蠣殼)去除焦油和 HCl，富含 Ni 的活性碳可以有效的去除焦油成分，以避免對設備的污染及損壞。Nugroho Agung Pambudi 等人[9]使用麻瘋樹當成生物質燃料，在硫化床氣化器中燃燒產生氫氣，隨溫度上升 CO 及 H₂ 增加同時 CO₂ 及 CH₄ 減少。Jin Wook Lee 等人[10]將氣化器所產生的爐渣再加工，可做為優質的能源燃料，可用於其他產業(如道路施工)中使用，達到更有效的利用化石燃料。Lijun Wang 等人[11]使用了兩階段式煤氣化的模擬，將煤氣化的氣化器分為兩個部分，在總量相同的情況下，分別注入不同比例的煤跟氧，模擬結果顯示使用兩階段式氣化器對於對於溫度及轉換率的影響很大。

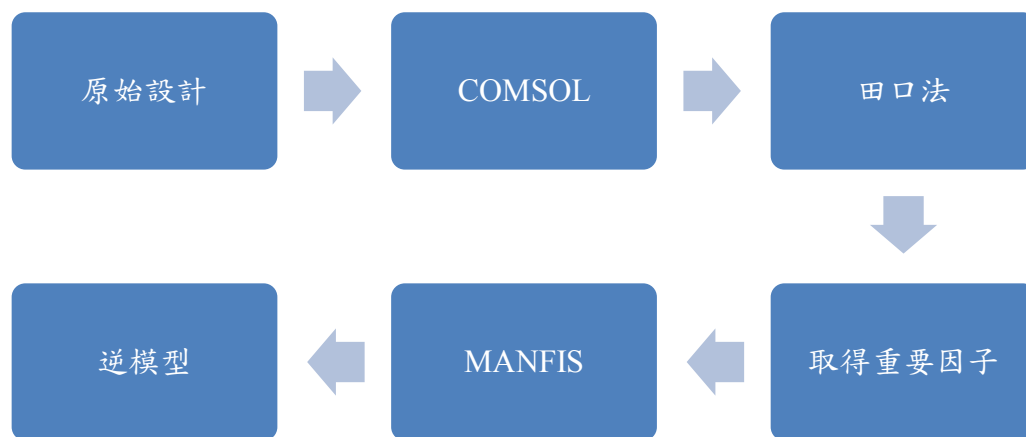
由於上述的氣化器相關研究都將重點放在去除焦油、利用生物質做為燃料、爐渣的再利用以及提升氣化器的轉換效率等，但這些都必須利用高溫燃燒來產生合成氣，卻少有對如何降低高溫所需耗能部分去做探討，使得氣化器在運作的過程還是得倚賴大量的能耗材得以正常運作，故如何改善此一問題成為本文的研究動機。

燃料電池發電的主要燃料為氫，在發電的過程中會產生大量的廢熱；回顧在燃料電池的廢熱回收技術發展上，Mortaza Yari 等人[12]曾提出以 SOFC 燃料電池將所排放出來的熱來預熱燃料，並比較合成氣與沼氣兩種方式的熱電效應。Xiaoqu Hana 等人[13]的研究設計出將使用 FPLPS(flue gas pre-dried lignite-fired power system)系統的 600MW 發電廠與廢熱回收的設計可以提高 1.7%的熱效率。

Ali Aminia 等人[14]的研究使用超臨界二氧化碳來使用廢熱回收系統上，以回收 450MW 的發電機的廢熱來提升發電效率，以熱力學角度上說此系統可以為工廠回收 6.3MW，但如果以實際上的條件上則可以回收 4.04MW，整體效率提高約 0.4%。G.V. Pradeep Varma 等人[15]利用有機郎肯循環(ORC)回收低溫(100~150°C)廢熱回收系統，來提高最大發電量。Govinda Mahajan 等人[16]利用麒麟熱管來達到廢熱回收的目的。

因此，為了提高氣化器的產氫效率並減少製程中 COX 的排放，本研究將以一傳統的氣化器為模型，設計一可利用燃料電池的廢熱，來對氣化器進行預熱的新型氣化器，以減少產氫過程中所需的能耗。

本研究將探討新型氣化器的預熱情形，首先使用 SOMSOL Multiphysics 軟體模擬出原始新型氣化器的預熱情形。為了取得最佳化設計的因素，必須探討所有因子的可能性。但是如果採用全因子法，會有大量的因子將會產生大量的計算與高成本，故本研究以田口方法來解決這個問題。首先，採用田口方法找出重要因子，並建立以使用最少數量實驗的直交表，以提供足夠的數據量來訓練 MANFIS 逆模型。接下來使用 COMSOL 實驗平台來確定各點的加熱到達穩定時間的數據，圖一顯示了最佳化設計與執行流程。



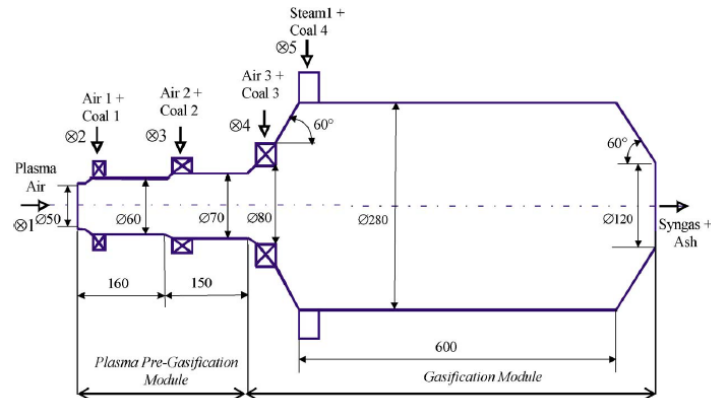
圖一、最佳化設計與執行流程

本研究所使用的新型氣化器模型進行預加熱系統，在原始設計的氣化器預加熱時間為 90 分鐘，使用最佳化設計後的預加熱時間為 42 分鐘，可減少 53% 的預加熱時間。故本研究可在不變更氣化器本體模型的條件下，使用廢熱進行預加熱且比原始設計的與加熱系統達到更快速加熱的目的。

2. 氣化器模型描述

本研究利用 Serhiy I. Serbin 等人[17]在 2010 年所發表的等離子煤氣化系統中所使用的氣化器來作為氣化器模型。等離子氣化是提供煤轉換成氫氣、電或其他能源最簡單的方式之一，氣化系統有兩個部分，前半段為等離子體預氣化與後

半段的氣化部分，氣化器模型如圖二所示。



圖二、氣化器模型

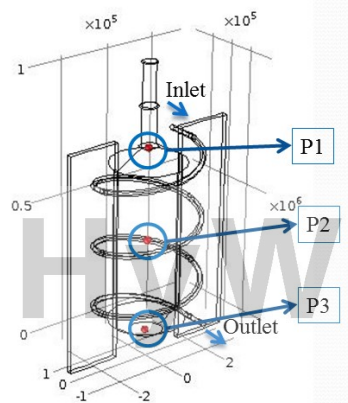
本研究的主要設計為，如何以最有效率的方式利用燃料電池產生的熱來加熱氣化器，以提升能源使用效率，本研究採用 COMSOL Multiphysics 用於模擬[18]。

本研究為了讓燃料電池的廢熱能夠以最佳的方式來加熱氣化器，採用田口方法與 MANFIS 使參數最佳化，以達到最佳化設計的目的。

3.1 COMSOL 模擬平台的建立

3.1.1 新型氣化器

本研究設計了一套利用 SOFC 的廢熱來進行氣化器的預加熱系統，為了使熱能更快傳遞到氣化器內部而進行最佳化設計，本研究將以最快達到穩定溫度的時間為基準，為了能夠以最快速的方式找出最佳化設計，使用田口方法來進行最佳化設計，為了能觀察到內部的溫度變化，將以氣化器內部的三點 P1、P2、P3(距離氣化器底部距離分別為 0mm、350mm、700mm 如圖三所示)當作量測點，量測三點均達到穩定溫度的時間最少的為最佳化設計，穩定溫度的定義為在無其他任何熱源的情況下達到入口最高溫度的 5% 為達到穩定溫度。



圖三、量測位置

模擬的初始條件如下:入口的邊界設定為在不同管徑下有相同的條件,入口速度將使用固態氧化物燃料電池的質量流率已達到相同條件的目的,入口溫度為等溫,對流通量邊界為出口,以銅做為固體導熱材料,熱管與麒麟片的接觸面以及鰭片與氣化器的接觸面均為熱壁,其他的接觸表面為絕緣壁,COMSOL 模擬其他必要條件及參數如表一所示。

表一、初始值

Parameter	Value
Material	Copper、Steam
Minimum working temperature	755 K
Outlet temperature of Fuel Cells [19]	1250 K
Inlet flow rate of Gasifier[20]	51 g/s

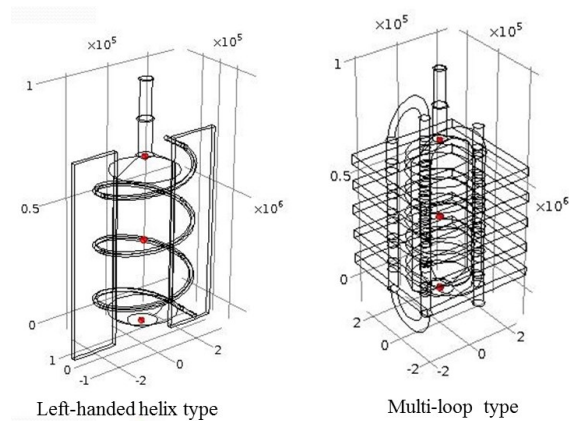
3.2 田口法

現今田口法也是工業界其中一套被廣泛使用的品質管理方法,雖然不如全因子法確切的找出最佳化位置,但經由選擇產品控制因子,設計直交表與簡潔的變異數分析,可在少量的實驗數據下有效提升並改善產品品質,可行性因而大於全因子法。在最佳化設計中,經由調整控制因子使品質達到最理想數值,藉由直交表實驗數據增加精確性。

本研究的控制因子表如表二所示:A 因子表示熱管的纏繞方式有多迴路類型與左螺旋類型如圖四所示,B 因子為鰭片數量,這因子是以麒麟片以均勻環繞的方式排列,數量分別為 2、4 及 6 片,C 因子為鰭片厚度,因鰭片厚度影響到熱接觸面積,所以鰭片厚度也可以將它視為控制因子,鰭片厚度分別為 20mm、40mm 及 60mm,以上兩種 B、C 因子為鰭片的控制參數,鰭片的控制將影響到熱管的熱傳遞到氣化器中;D 因子為熱管的纏繞圈數,熱管的纏繞圈數將影響到熱傳遞到鰭片的接觸數量,熱管纏繞圈數為 3 圈、5 圈及 7 圈,E 因子為熱管的管徑,本研究所採取的管徑為一般標準規格,因入口為質量流率,所以管徑的大小會間接地影響到流體的速度,管徑越大流速越慢,反之亦然,流速的快慢也影響到熱傳遞的時間,熱管的半徑為 10mm、25mm 及 40mm,D 因子及 E 因子為熱管的控制參數,熱管的控制會影響到入口熱源將熱傳遞到鰭片上,本研究將使入口的熱源以最佳化的方式傳遞到氣化器中,以達到最快加熱穩定的時間。

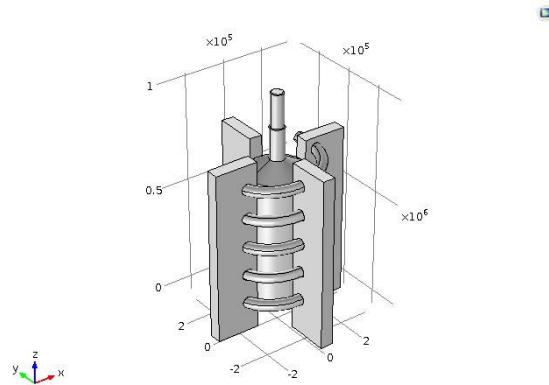
表二、控制因子表

Factors	Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
A	Turning styles of heat pipes (TShp)	Multi-loop type	Left-handed helix type	
B	Fin number (Nf)	2	4	6
C	Fin thickness (tkf)	20mm	40mm	60mm
D	Heat-pipe number (Nhp)	3(turns)	5(turns)	7(turns)
E	Pipes radius	10(mm)	25(mm)	40(mm)

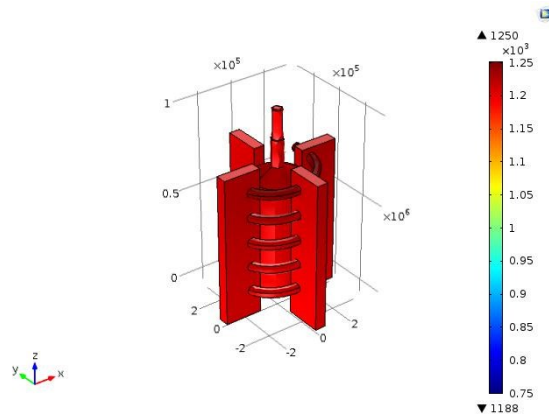


圖四、熱管纏繞方式

圖五為熱交換原始設計，因 A 控制因子只有兩種變化故設定在 Level 1 其餘控制因子均設定在 Level 2，中間部分為汽化器本體，鰭片與熱管為控制因子。由圖五作為原始設計，使用 COMSOL 模擬軟體進行分析，取得原始設計數值，由 COMSOL 模擬結果得知原始設計三個內部量測點(P1、P2 及 P3)均到達穩定溫度的時間為 90 分鐘，在第 90 分鐘時熱分佈圖如圖六所示，出口溫度為 1197.37K。



圖五、原始設計



圖六、原始熱分佈圖

為了達到最佳化設計，必須探討所有因子組合的可能，但是如果使用全因子法需要大量的實驗數據，將需要大量的時間成本。在本研究中使用田口方法，來克服這個問題，田口方法是以統計學的方式以最少的實驗數據去計算出最佳的結果，田口方法在進行計算時必須要先建立直交表，本研究採用 L18(21x34)直交表，故只需要利用模擬軟體模擬 18 組，就可以達到 162 次(21x34)的效果直交表設計與模擬結果如表三所示，在將其套用到田口方法中的望小公式(1)以取得最快內部均到達穩定時間，計算結果如表四所示，利用表四結果所繪製的 SN 響應圖如圖七所示，SN 值越大代表產品的品質越高， \bar{y} 為 n 個測量值的平均值，Sn 為 n 個量測值的標準差。

$$S/N_{SB} = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = -10 \log (\bar{y}^2 + S_n^2) \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3)$$

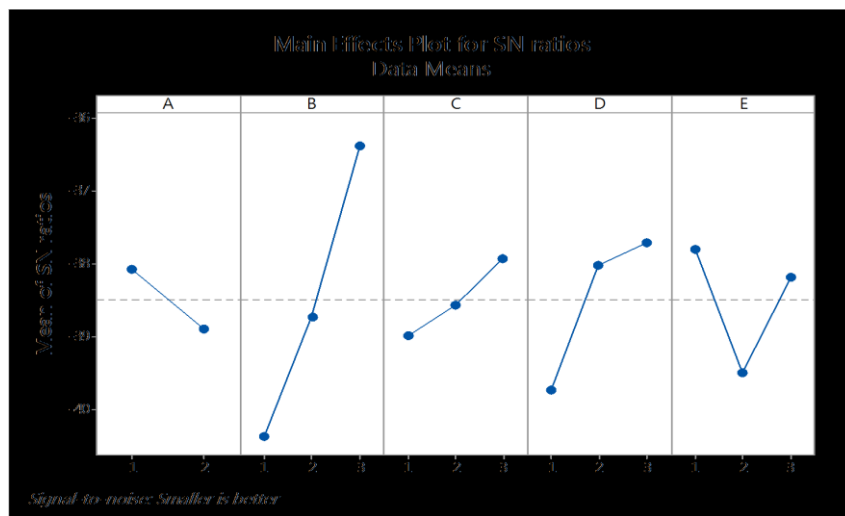
表三、L18(2¹x3⁴)直交表與模擬結果

exp.	A	B	C	D	E	p1	p2	p3	Max
1	1	1	1	1	1	160	164	162	164
2	1	1	2	2	2	88	90	90	90
3	1	1	3	3	3	78	80	82	82
4	1	2	1	1	2	86	88	88	88
5	1	2	2	2	3	84	88	92	92
6	1	2	3	3	1	56	54	54	56
7	1	3	1	2	1	52	52	52	52
8	1	3	2	3	2	72	78	82	82
9	1	3	3	1	3	54	56	60	60
10	2	1	1	3	3	100	96	98	100
11	2	1	2	1	1	90	100	90	100
12	2	1	3	2	2	110	106	108	110
13	2	2	1	2	3	90	88	90	90
14	2	2	2	3	1	66	76	68	76
15	2	2	3	1	2	132	132	134	134
16	2	3	1	3	2	74	74	74	74
17	2	3	2	1	3	72	70	70	72
18	2	3	3	2	1	54	54	60	60

時間單位為:min

表四、SN 計算結果

Level	A	B	C	D	E
1	-38.08	-40.38	-39	-39.74	-37.79
2	-38.91	-38.73	-38.57	-38.03	-39.5
3		-36.38	-37.92	-37.72	-38.19
Delta	0.83	4	1.08	2.02	1.71
Rank	5	1	4	2	3



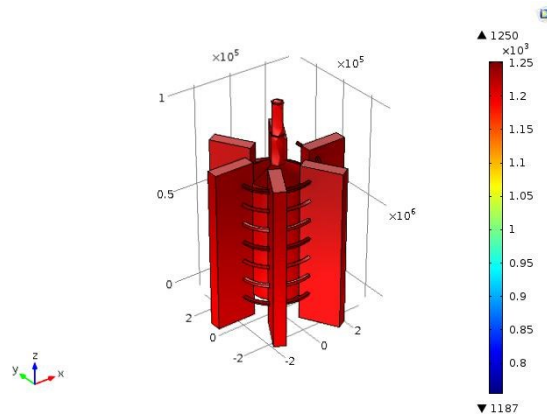
圖七、SN 響應圖

根據圖五的原始設計，在依圖一的設計流程，可以獲得對應於三個特定點的最小穩定溫度的製造因子，因子 A 及 E 使用第一級，因子 B、C 及 D 使用第三級，使用 COMSOL 進行模擬，表五顯示了在最佳化設計中量測點到達穩定溫度的時間，三個量測點均到達穩定溫度的時間為 42 分鐘，熱分佈圖如圖八所示，量測點均達到穩定溫度的時間比原始設計快了 53%。

表五、最佳化設計中量測點到達穩定溫度的時間

P1	P2	P3	Max
30	36	42	42

單位:[min]



圖八、最佳熱分佈圖

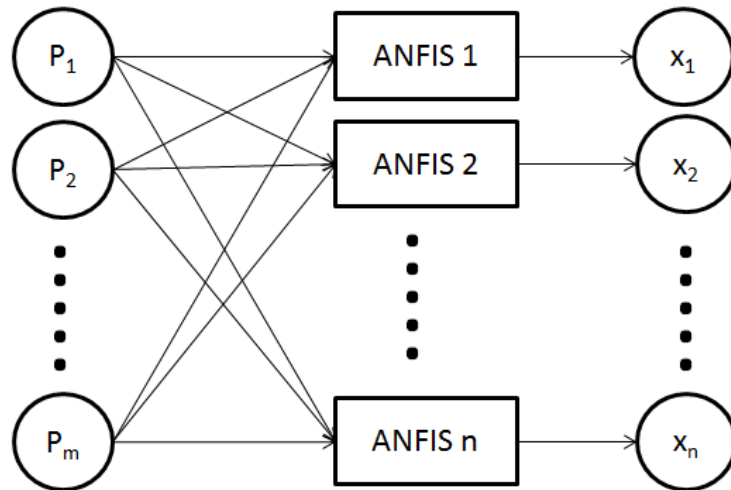
3.3 MANFIS 逆向模型

3.3.1 MANFIS

通常在生產製造的過程中，由輸入的結果找到輸出的答案為第一個已知的信息，而由輸出結果尋找輸入參數稱為逆向模型。與傳統的方式相比，使用神經網路的逆模型可以在更短的時間內得到最簡單的解決方法，但此模式會有較困難的訓練方法。使用神經系統與模糊邏輯系統的優點，所產生出的自適應類神經網路模糊推論系統(ANFIS)可以有效的解決此問題，ANFIS 有學習時間短與容易收斂等優點，由於 ANFIS 有多輸入單輸出的特點無法進行多輸出的工作，故使用多 ANFIS 的 MANFIS 架構，來達到多輸入多輸出的特性。

3.3.2 MANFIS 逆向模型架構

本研究所使用的 MANFIS 系統架構如圖九所示，MANFIS 是由多個 ANFIS 所組成， p 與 x 為逆模型的輸入及輸出，由多個 ANFIS 可以達到多輸入多輸出的特性。



圖九、MANFIS 系統架構

利用 MANFIS 逆模型輸入理想的輸出，訓練找出適合的輸入參數，帶入到 COMSOL 軟體驗證。

利用表四的 SN 計算結果採用一半準則找出的重要因子，並以重要因子重新建立 L9 直交表，直交表中控制因子與模擬結果如表六所示，再將直交表的輸入輸出關係，套用到 MANFIS 進行逆向模型中學習訓練的參數，表七為 MANFIS 逆向模型的模擬數據，在逆模型中輸入參數為各量測點到達穩定的時間，輸出為製造所需要的參數。在表七中可以發現逆向模型在原始輸出上的準確度是夠的，如表七中前五組參數所示，但如果輸入為其它參數常會產生小數點，然而在此重要因子中非整數是不合理的，故需取最接近的整數作為參數設定。

表六、L9 直交表

Exp.	鰭片數	圈數	管徑(r)	P1	P2	P3
1	2	3	10	104	106	108
2	2	5	25	86	88	90
3	2	7	40	78	80	82
4	4	3	25	98	100	104
5	4	5	40	82	84	88
6	4	7	10	56	54	54
7	6	3	40	54	56	60
8	6	5	10	94	100	106
9	6	7	25	88	94	100

時間單位:min

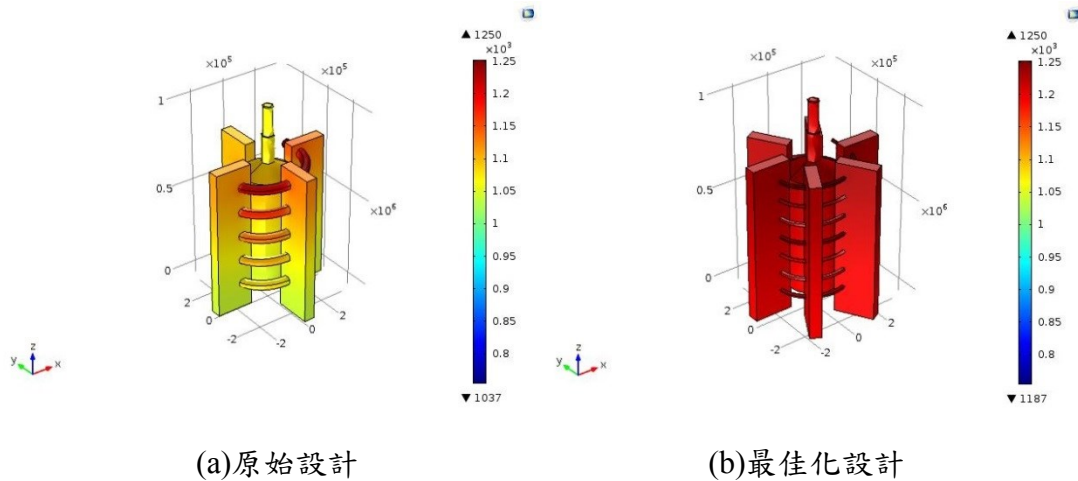
表七、MANFIS 逆向模型模擬數據

輸入			輸出		
P1	P2	P3	鰭片數	圈數	管徑(r)
86	88	90	2	5	25
98	100	104	4	3	25
82	84	88	4	5	40
54	56	60	6	3	40
88	94	100	6	7	25
28	34	40	5.67	6.62	9.45
19	19	19	3.12	3.62	5.24
26	32	38	5.34	6.24	8.9

4. 研究結果

本文提出了一種新型氣化器的最佳化設計，該設計使用了田口方法作為最佳化設計，並建立 MANFIS 逆向模型找到最符合客制化需求的參數。以 COMSOL Multiphysics 軟體用於模擬平台。根據 Serhiy I. Serbin 等人[17]指出，等離子火炬壽命不會超過 300-500 小時，本研究提出的方法可在不改變氣化器本體下，有效使氣化器內部達到接近工作溫度，因使用廢熱回收系統，固可降低能源的使用量。

在使用最佳化廢熱回收系統的狀態下，熱回收效率可使原始設計減少 53% 的加熱時間，從原始設計達到穩定溫度的時間需 90 分鐘，最佳化設計後只需要 42 分鐘，在第 42 分鐘時原始設計及最佳化設計的溫度分布圖如圖十所示，及各量測點的溫度如表八所示，可以看到在第 42 分鐘時，最佳化設計的溫度明顯比原始設計高，且平均溫度也比原始設計高 141.5K，可以看出最佳化設計比原始設計優化許多。



圖十、溫度分布圖

表八、量測點溫度

	P1	P2	P3	Avg.
原始設計	1087.57	1067.01	1043.66	1066.08
最佳化設計	1221.84	1208.29	1192.71	1207.61

單位:K

5. 討論

本研究中的 MANFIS 逆模型經過模擬驗證完後，證明 MANFIS 逆模型在此系統上的可行性，MANFIS 系統在經過學習後，精準度是相當高的。只是受限於實際狀況，輸出結果必須要以四捨五入的方式，找到最接近的整數，以取得最接近的參數。

6. 結論

本研究完成了氣化器與燃料電池間的結合，並建立能夠有效利用燃料電池所產生的廢熱來加熱氣化器，藉以減少氣化器加熱所需要的燃料，在不改變氣化器原始模型的狀態下，提出外部加熱式氣化器，將可以大幅減少改變氣化器模型設計上的成本。在與燃料電池結合之後，將以花費更便宜的燃料(煤)，來同時生產高單價的能源(氫及電力)。為了因應客制化需求，建立了 MANFIS 逆模型系統，將以更貼近需求的方式，找出最適合的參數設計，將可以節省掉許多重複進行模擬實驗就為了找出最合適參數的時間。

References

- [1]International Energy Agency, Medium Term Energy Efficiency Market Report 2015.
- [2] R. I. Rabady, and B. Kenaan, "Power spectral shaping for hydrogen production from silicon based hybrid thermo-photovoltaic water electrolysis," *Energy*, vol. 133, pp. 1-8, August. 2017,
- [3]D. Czyilkowski , B. Hrycak , M. Jasinski , M. Dors , J. Mizeraczyk, "Microwave plasma-based method of hydrogen production via combined steam reforming of methane," *Energy*, vol. 113, pp. 653-661, October. 2016.
- [4] C. Yilmaz, M. Kanoglu, "Thermodynamic evaluation of geothermal energy powered hydrogen production by PEM water electrolysis," *Energy*, vol. 69, pp. 592-602, May. 2014.

- [5] A. Xia , A. Jacob , C. Herrmann , J. D. Murphy , “Fermentative bio-hydrogen production from galactose,” *Energy*, vol. 96, pp. 346-354, February. 2016.
- [6] Y. Nishida, H. C. Chiang, T. C. Chen, C. Z. Cheng, “Efficient Production of Hydrogen by DBD Type Plasma Discharges,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 12, pp. 3765-3771, December. 2014, 10.1109/TPS.2014.2354695.
- [7] M. A. Adnan , H. Susanto , H. Binous , O. Muraza , M. M. Hossain , “Enhancement of hydrogen production in a modified moving bed downdraft gasifier e A thermodynamic study by including tar,” *International Journal of Hydrogen Energy* , vol. 42, pp. 10971-10985, February. 2017.
- [8] M. H. Cho, Y. K. Choi, J. S. Kim, “Air gasification of PVC (polyvinyl chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas,” *Energy*, vol. 87, pp. 586-593, July. 2015.
- [9] N. A. Pambudi, T. Laukkanen , M. Syamsiro , I. M. Gandidi, “Simulation of *Jatropha curcas* shell in gasifier for synthesis gas and hydrogen production,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 90,no. 5, pp. 1-8, October. 2017.
- [10] J. W. Lee , S. J. Lee , Y. Jamal , Y. Yun, “Partial slagging coal gasifier operational performance and product characteristics for energy sustainability in an integrated gasification combined cycle system,” *Journal of the Energy Institute*, pp. 1-10, May. 2017.
- [11] L. Wang , Y. Jia , S. Kumar, R. Li , R. B. Mahar , M. Ali , I. N. Unar , U. Sultan , K. Memon, “Numerical analysis on the influential factors of coal gasification performance in two-stage entrained flow gasifier,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1601–1611, February. 2017.
- [12] M. Yari , A. S. Mehr , S. Mohammad , M. Santarelli, “A comparative study of two SOFC based cogeneration systems fed by municipal solid waste by means of either the gasifier or digester,” *Energy*, vol. 114, pp. 586-602, November. 2016.
- [13] A. Amini , N. Mirkhani , P. P. Pourfard , M. Ashjaee, M. A. Khodkar, ” Thermo-economic optimization of low-grade waste heat recovery in Yazd combined-cycle power plant (Iran) by a CO₂ transcritical Rankine cycle”, *Energy*, vol. 86, pp. 74-84, June. 2015.

- [14] W.A.N. W. Mohamed , M. H. M. Kamil, ” Hydrogen preheating through waste heat recovery of an open-cathode PEM fuel cell leading to power output improvement”, *Energy Conversion and Management*, vol. 124, pp. 543–555, September. 2016.
- [15] G.V. Pradeep Varma , T. Srinivas, “Power generation from low temperature heat recovery,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 402–414 August. 2017.
- [16] G. Mahajan , S. M. Thompson , H. Cho, “Energy and cost savings potential of oscillating heat pipes for waste heat recovery ventilation,” *Energy Reports*, vol. 3 , pp. 46–53, November. 2017.
- [17]S. I. Serbin, I. B. Matveev, “Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 38, no. 12, pp. 3300 – 3305, November. 2010, 10.1109/TPS.2010.2086495.
- [18]B. Laoun, M. Belhamel, “A Three Dimensional Model to Simulate Power Performance of a Single Solid Oxide Fuel Cell,” *2012 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, pp. 151-155, June. 2012, 10.1109/EFEA.2012.6294070.
- [18] C. N. Huang, C. C. Yu, “Integration of Taguchi’s method and multiple-input, multiple-output ANFIS inverse model for the optimal design of a water-cooled Condenser,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 98, pp. 605–609, April. 2016.
- [19] B. Laoun, M. Belhamel, “A Three Dimensional Model to Simulate Power Performance of a Single Solid Oxide Fuel Cell ,” *2012 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, pp. 151-155, June. 2012, 10.1109/EFEA.2012.6294070.
- [20] TVVS Lakshmi, P Geethanjali, K. Prasad S, “Mathematical modelling of solid oxide fuel cell using Matlab/Simulink,” *International Conference on Microelectronics, Communication and Renewable Energy (ICMiCR-2013)*, June. 2013, 10.1109/AICERA-ICMiCR.2013.6576016.



