

模糊多目標規劃於中央廚房設備選擇之應用

An Application of Fuzzy Multi-Objective Linear Programming in the Selection of Kitchen Equipment

蘇泰盛¹ Tai-Sheng Su 吳靖純² Chin-Chun Wu 邱維洳¹ Wei-Ju Chiu
國立屏東科技大學工業管理系 義守大學資訊管理學系 國立屏東科技大學工業管理系

¹Department of Industrial Management, National Pingtung University of Science and Technology and ²Department of information management, I-SHOU University

(Received December 11, 2012; Final Version June 19, 2013)

摘要：現今學生的午餐大多在學校食用，然而多數高中（職）學校學生的營養午餐是透過外包，設置中央廚房較不普及。在設置時除考量設備投資成本外，能源使用所產生的 CO₂ 排放量亦需納入，才能符合政府推動節能減碳的目標。因此本研究同時兼顧低碳與低成本二個目標，運用模糊多目標線性規劃法，建構一個設備決策最佳化模式，提供決策者購置設備之參考，以期達到節能減碳與成本效能之目的。本研究調查中央廚房之主要設備，包括鍋爐、蒸箱、冰箱、排油煙機及洗碗機等，從成本面與能源面進行分析。在成本方面，考量設備之購置成本、安裝成本及維護成本；在能源方面，考量設備使用之規格、型式與能源使用類型，包括油、電、瓦斯及水，轉換為 CO₂ 排放量。建構設備總成本與 CO₂ 排放量極小化之多目標線性規劃，並提出模糊多目標線性規劃求解程序。以南部某高中（職）學校為測試對象，將實際所蒐集的相關參數值帶入模式中，進行案例分析，比較單目標解與模糊多目標之目標值與整體滿意情況，確切顯示本研究提出之模式較符合實務的需要。

關鍵詞：中央廚房、設備選擇、二氧化碳排放、模糊多目標線性規劃

Abstract: This paper proposes a fuzzy multi-objective linear programming (FMOLP) model for

本文之通訊作者為吳靖純，e-mail: chinchunw@isu.edu.tw。

作者非常感謝兩位匿名審查委員提供寶貴的意見，並感謝國科會之研究計畫補助（計畫編號：NSC 100-2218-E-020 -004）。

solving the central-kitchen equipment decisions problem of the schoolyard environment. This model was applied to solve multiple-equipment, multiple-types, multiple-specifications, and multiple-energy central-kitchen equipment decisions problem with a focus on equipment allocation, capacity limit, and demand quantity for central-kitchen equipment decisions of schoolyard environment. To test the model adequacy, using a high school case demonstrates the feasibility of applying the proposed model to a real-world central-kitchen equipment decisions problem in the schoolyard under uncertain environments.

Keywords: Central Kitchen, Equipment Selection, Carbon Dioxide Emissions, Fuzzy Multi-Objective Linear Programming

1. 前言

現今學生的午餐都在學校食用，有些學校會招標外包廠商或者設置中央廚房供應營養午餐，其中部分外包廠商提供的便當會使用免洗筷、塑膠類或紙類的便當盒，而這些餐具會造成垃圾量及 CO₂ 排放量的增加。多數國中小學普遍設置中央廚房與餐廳，不但能增進學童營養，也能減少餐後的垃圾量及碳排放量，但在高中（職）學校中央廚房的設置卻不普及，為了顧及學生的健康、營養、安全與衛生，並達到節能減碳之目標，本研究以高中（職）中央廚房設備進行節能減碳與成本分析，如：相同規格之柴油式鍋爐設備成本低，但碳排放量較高；而瓦斯式鍋爐設備成本高，但碳排放量較低，決策者必須同時兼顧設備成本與碳排放量二個目標，進行中央廚房之設備選擇。然而過去多數研究均探討單一目標（成本極小），實務上設備選擇除了追求成本極小化之外，亦會同時兼顧其他目標，如配合政府法令考量碳排放總量極小化。再者，從決策環境面來看，多數文獻一般皆設定相關決策參數如設備產能、需求及其他決策條件皆為確定數值，此與實際決策者常含有相當程度的不確定性及模糊性不符。決策者實際在進行設備選擇時所面對的是多個模糊目標問題，如：設定在一個規劃期間（10 年）的總投資設備成本目標值“設備投資預算大約為 1000 萬元”，每年規定中央廚房碳排放量“不可超過 20 公噸”，即為不精確的目標值。在此情況下，決策者應導入模糊目標概念，利用模糊集理論來因應資訊不精確所產生的模糊多目標規劃問題。

過去設備選擇之相關文獻，多數是應用 AHP 層級分析法 (analytical hierarchy process)、TOPSIS 理想解類似度偏好順序評估法 (technique for order preference by similarity to ideal solution)、ELECTRE 選擇轉換本質法 (elimination et choice translating reality method)，鮮少學者運用模糊多目標規劃法於中央廚房設備選擇進行探討。本研究之目的是以低成本與低碳排放量為考量重點，建構模糊多目標線性規劃模式，運用一實際案例進行模式測試，並藉由案例分析

驗證模式之正確性與適用性，以提供未來學校設置中央廚房設備選擇之參考。

2. 文獻探討

本研究後續針對中央廚房耗能設備、設備選擇及模糊多目標規劃法進行相關文獻回顧。

2.1 中央廚房耗能設備

中央廚房是在單一時間內提供大量的餐點，在製作團膳時會因應不同的工作環節而使用不同的設備，主要的高耗能設備，包括鍋爐、蒸箱、冰箱、排油煙機、洗碗機等。一個衛生安全的廚房，除了建築物本身須具備良好的通風及採光條件外，尚必須包括環境衛生維護與順暢之作業流程。圖 1 為營養午餐團膳作業流程，從食材進貨、秤重驗品、初步處理、半成品加工、烹煮、配膳供應到餐具消毒保管的作業及廚具設計動線是否流暢，希望在最短的距離和最少的時間內完成食品的製作與供應。

中央廚房於團膳製作時會使用到多種設備，如：當生鮮食材進貨後，保存上必須仰賴冰箱，中央廚房內冰箱分為雙門冰箱與四門冰箱兩種。在菜餚製作時，所使用的設備為鍋爐，主要使用於烹調菜餚（炒、炸方式），現今中央廚房內的鍋爐依能源類型分為兩種型式：燃油型鍋爐與瓦斯型鍋爐。在煮白飯時，所使用的設備為蒸箱，蒸箱依耗用能源分為電子型蒸箱與瓦斯型蒸箱兩種型式。在製作餐點時，必然會產生油煙，排油煙機有自動水洗式與靜電式兩種。團膳製作後，必須進行餐具的洗滌，洗碗機型式有電力型洗碗機與瓦斯型洗碗機。

2.2 設備選擇之相關文獻

設備決策是依據企業生產方案以及評估企業內、外部環境的狀況，制定、評價、選擇企業設備方案，因此設備決策決定了設備的使用壽命、施工工期、製造成本和產品品質等。當決策者實際進行設備選擇時，並非只考慮單一的目標或屬性來決定，而會考慮相關因素才能符合實際的需求。但往往考慮的設備決策因素中都是相互衝突的，而多屬性決策方法 (multi-attribute analysis model)，可應用解決考量多目標與多屬性的問題。Hwang and Yoon (1981) 認為多屬性決策方法為決策者在多個質化或量化的評估準則下，對已知一組有限、可數且數目不大的可行替代方案進行評估，針對各替代方案之優劣進行排序。隨後，有些學者考量實務決策參數具不確定性，又加入模糊理論，如Kulak *et al.* (2005) 運用多屬性模糊公理設計方法 (multi-attribute fuzzy axiomatic design approach) 於製造系統之設備選購。Kulak (2005) 探討物料加工設備選擇問題，同時考量技術面與經濟面，運用專家資料庫與模糊多屬性法，開發一個決策支援系統，並應用於真實的案例上。Tuzkaya *et al.* (2010) 提出一個整合模糊多屬性決策方法，應用於製造公司物料加工機台之選擇問題。

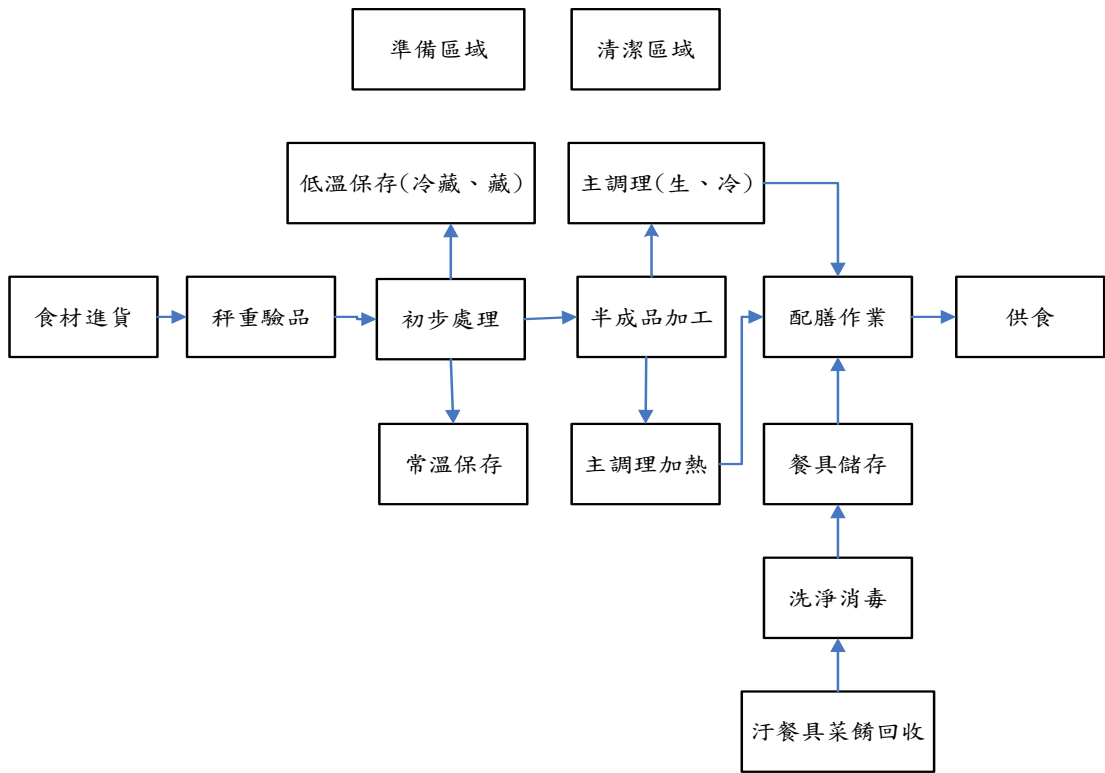


圖 1 營養午餐團膳作業流程 (Kazarian, 1976)

部分的學者也應用層級分析法 (analytical hierarchy process; AHP) 研究設備選擇問題, 如 Lin and Yang (1996) 應用於彈性製造系統之設備選擇。管培智 (民 91) 結合 AHP 與工程經濟, 進行航空教學設備之抉擇。朱克隆 (民 97) 考量設置自動倉儲之成本面與績效面發展一決策模型, 運用 AHP 與蒙地卡羅模擬方法, 針對單元負載式自動倉儲及流動式自動倉儲進行比較, 提供建構自動倉儲系統時之參考。鄧玉珮 (民 97) 結合 AHP 與逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution; TOPSIS), 進行 TFT-LCD 液晶注入製程中之設備選擇。邵亭芬 (民 98) 應用於半導體後半段之設備選購。Paramasivam *et al.* (2011) 探討銑床設備選擇問題, 並提出一個整合方法, 該方法同時納入三種方法, 包括有向圖與矩陣法 (digraph and matrix approach)、AHP 及網路分析法 (analytical network process) 進行設備選擇。Fatahi *et al.* (2012) 應用 AHP 與選擇轉換本質法 (elimination et choice translation reality; ELECTRE) 進行油田中升降系統之選擇。Durán and Aguilo (2008) 結合模糊集合理論, 設計一個 fuzzy-AHP 方法, 並開發一套電腦系統, 提供工具機台之設備選擇。余孟修 (民 100) 結合 fuzzy-AHP 與 fuzzy-TOPSIS, 應用於 TFT-LCD 黃光製程濕式設備之遴選問題。

其他設備選擇相關文獻還包括：董中浪 (民 92) 根據物流中心的作業需求，提出物流設備選擇步驟供實務參考。Fonseca *et al.* (2004) 探討物料加工運輸設備之選擇問題，利用權重評估法和期望值準則，開發一套專家系統供業界使用。Cao *et al.* (2005) 探討平行機台選擇與工件排程問題，考量成本最小化為目標，成本項目包括儲存成本和延遲成本，發展一啟發式演算法求解該問題。Chtourou *et al.* (2005) 探討製造系統之設備選擇問題，利用模擬方法，建構一個模擬專家決策系統，決定最適的設備組合。Mahdavi *et al.* (2011) 探討彈性製造系統之物料加工機台選擇問題，為了兼顧機器設置成本最小化與機器利用率最大化為目標，建構一數學規劃模式，該模式之目標函數均為確定性，並發展一蟻群演算法進行問題求解。Özdemir and Ayağ (2011) 探討組裝式生產線之設施規劃問題，提出一個整合方法，該方法主要是採用分枝界限法與層級分析法，並開發一套電腦系統進行設備選擇。Poon *et al.* (2011) 探討各種生產批量 (包括小批量、中批量及大批量) 的物料需求問題，根據需求量來規劃最適的物料加工設備，該研究以總等待時間最小化為目標，建構一數學規劃模式，並利用基因演算法設計一求解程序，再進行案例求解與測試。Zarifov *et al.* (2011) 探討多種油品混合系統之設備選擇問題，考量有限的規劃期限，為使總生產成本最小化，利用線性規劃法建構一個數學模式，協助決策者針對各種油品之生產，進行設備規劃。

2.3 模糊多目標規劃

模糊集理論 (fuzzy set theory) 是一項廣泛使用於不同評估準則資訊不足之模式建構問題，有助於實務問題之決策。模糊多目標決策方法是結合模糊集合觀念與多目標決策技巧，將限制式、參變數即評估目標之模糊性加以考慮，並利用數學規劃方式求取組合最佳解。模糊集理論最早是由加州大學教授Zadeh (1965) 提出，Bellman and Zadeh (1970) 隨後擴展出一個可以解決含不確定特性之決策問題。Zimmerman (1978) 更進一步彙整多目標規劃之應用觀念，並且導入利用線性歸屬函數作為表達與整合每個模糊目標，然後轉換為線性規劃 (linear programming; LP) 求解型態，以解決模糊理論應用的問題。

模糊多目標在近年來相關應用上，王泰裕 (民90) 利用模糊多目標規劃進行彈性製造系統設備的選擇，其目標為總採購成本最低、總機器地板面積最少、總機器數最少與總產能最高，選擇所需之機器設備。Borges and Antunes (2003) 指出使用模糊集概念理論相當的影響含有模糊性的多目標線性規劃模式，並建議以互動的方式來尋找權重，權重是根據目標函數及限制式中不同區間值的滿意度而定，在機率值介於0~1之間的灰色地帶中比較分析不同的權重，研究證實模糊集理論提供研究發展的基礎，可有效率的計算模式參數的變化對目標值的影響。Tuzkaya *et al.* (2010) 結合模糊集理論與分析網路程序法選擇物料搬運設備問題，Liang (2006) 發展互動式模糊多目標線性規劃，解決運輸配送問題。Peidroa and Vasant (2011) 考量成本與交貨時間下，解

決運輸規劃決策問題。

綜合上述，目前設備選擇的研究以 AHP 法為多數，研究對象為高科技產業與製造業為主，但鮮少學者利用模糊多目標規劃法，同時兼顧設備總成本與碳排放量極小化為目標，進行中央廚房之設備選擇。

3. 模式建構

本研究主要以總成本最低與碳排放量最小化建構模糊多目標決策模式，探討學校在設置中央廚房時，決定最適數量之設備類型、型式、規格及數量。

3.1 問題描述

本節介紹建構中央廚房時之設備選擇，以成本面與能源面進行分析，在成本面包括中央廚房所需的投資設備成本，如：鍋爐、抽油煙機、冷凍（藏）冰箱等設備之購入、安裝成本，並推估其所需的能源耗用情況進行能源面分析，再將能源耗用量透過公式轉換出當量。而依據不同設備類型、型式、規格，會產生不同購入成本與碳排放量，選擇最適之設備讓設備成本與碳排放量最小化。

根據上述之問題情境，建置模糊多目標中央廚房設備之最佳化決策模式，以總成本最低與碳排放量最小化為目標，在符合數學模式之各項限制條件下，建構中央廚房最適設備組合。

3.2 研究假設

本研究之假設條件，如下：

- (1) 考量學校之午餐供應為主。
- (2) 中央廚房基本設備為主，管路、配線、照明等不考量。
- (3) 能源以電、柴油、瓦斯及水為主。
- (4) 各目標函數具模糊性，並採用區段線性函數來表示各目標函數。
- (5) 在設備規劃期間內，相關的決策參數值包括：購入成本、安裝成本、維護成本、能源成本、能源耗用量及設備產能限制，皆為確定性。

符號定義

i ：中央廚房設備類型， $i = 1, 2, \dots, I$ 。

j ：中央廚房設備型式， $j = 1, 2, \dots, J$ 。

k ：中央廚房設備規格， $k = 1, 2, \dots, K$ 。

t ：設備規劃期間， $t = 0, \dots, T$ ，其中 $t = 0$ 為期初， $t = T$ 為總規劃期。

q ：能源使用類型， $q = 1, 2, 3, 4$ ，其中 $q_1 =$ 電能； $q_2 =$ 柴油； $q_3 =$ 瓦斯； $q_4 =$ 水。

CF_{0ijk} : 第 i 種設備類型, 第 j 種設備型式內第 k 種規格之購入成本 (元/台)。

F_{0ijk} : 第 i 種設備類型, 第 j 種設備型式內第 k 種規格之安裝成本 (元/台)。

C_0 : 中央廚房期初投入總成本。

M_t : 第 t 年的維護成本 (元/年)。

N_t : 第 t 年的維護次數 (次/年)。

h_{ijk} : 第 i 種設備類型中第 j 種類型內第 k 種規格的使用時間 (小時/天)。

kw_{ijk} : 第 i 種設備類型中第 j 種類型內第 k 種規格使用電力的瓦數 (千瓦)。

l_{ijk} : 第 i 種設備類型中第 j 種類型內第 k 種規格使用柴油的數量 (公升)。

p_{ijk} : 第 i 種設備類型中第 j 種類型內第 k 種規格使用桶裝瓦斯的公斤數 (公斤)。

w_{ijk} : 第 i 種設備類型中第 j 種類型內第 k 種規格耗水的公升數 (公升)。

TE_t : 第 t 年中央廚房 CO_2 的總排放量, 包括使用電力、柴油、瓦斯及水的碳排放量(kgCO₂e)。

Te_t : 第 t 年中央廚房使用電力排放 CO_2 的總量 (kgCO₂e)。

To_t : 第 t 年中央廚房使用柴油排放 CO_2 的總量 (kgCO₂e)。

Tp_t : 第 t 年中央廚房使用瓦斯排放 CO_2 的總量 (kgCO₂e)。

Tw_t : 第 t 年中央廚房使用水排放 CO_2 的總量 (kgCO₂e)。

E_q : 第 q 種能源類型的排放係數, $q=1, 2, 3, 4$,

其中, $q=1$ 表示電的耗能, $1kwh/0.612$ kgCO₂e; $q=2$ 表示柴油的耗能, $1L/2.7$ kgCO₂e; $q=3$ 表示瓦斯的耗能, $1kg/3.19$ kgCO₂e; $q=4$ 表示水的耗能, 1 度/ 0.21 kgCO₂e。

Ce_t : 第 t 年中央廚房使用電力的成本費用 (元/年)。

Co_t : 第 t 年中央廚房使用柴油的成本費用 (元/年)。

Cp_t : 第 t 年中央廚房使用瓦斯的成本費用 (元/年)。

Cw_t : 第 t 年中央廚房使用水的成本費用 (元/年)。

D : 每天中央廚房需求餐點數量 (份/日)。

b_{1jk} : 第 j 種設備型式第 k 種規格之鍋爐可生產數量 (份/小時)

s_{2jk} : 第 j 種設備型式第 k 種規格之蒸箱可生產數量 (份/小時)

b_{1jk}^{\max} : 第 j 種設備型式內第 k 種規格之鍋爐生產數量上限 (份/小時)。

b_{1jk}^{\min} : 第 j 種設備型式內第 k 種規格之鍋爐生產數量下限 (份/小時)。

s_{2jk}^{\max} : 第 j 種設備型式內第 k 種規格之蒸箱生產數量上限 (份/小時)。

s_{2jk}^{\min} : 第 j 種設備型式內第 k 種規格之蒸箱生產數量下限 (份/小時)。

Q_t : 在特定時間第 t 年內, 二氧化碳允許的排放量 (kg CO₂e)。

X_{0ijk} : $\begin{cases} 1 & \text{期初選擇第 } i \text{ 種類型, 第 } j \text{ 種型式, 第 } k \text{ 種規格的設備 (台)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

3.1 模糊多目標線性規劃模式

目標函數一：設備總成本最小化

$$\text{Min } Z_1 \cong \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t \quad (1)$$

公式(1)為設備總成本，該式包含設備期初投資成本、每年設備維護費用與設備能源成本等三個部份，其中 CF_{0ijk} 和 F_{0ijk} 為不同設備的購入成本與安裝成本。中央廚房要維持設備正常運作，每年要固定排定設備維護次數，其中 M_t 為設備每年的維護成本、 N_t 為設備每年的維護次數，當設備在運作時會耗用能源，其中 CE_t 為中央廚房每年的能源成本。

$$\begin{aligned} CE_t &= Ce_t + Co_t + Cp_t + Cw_t \\ &= \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times kw_{ijk} \times C_1) + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times l_{ijk} \times C_2) \\ &\quad + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times p_{ijk} \times C_3) + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times w_{ijk} \times C_4) \end{aligned} \quad (2)$$

中央廚房設備在運作時會使用能源，依據能源種類會產生不同的能源成本，其中 $kw_{ijk} \times C_1$ 為所使用每度電的能源成本、 $l_{ijk} \times C_2$ 為所使用的柴油每公升的能源成本、 $p_{ijk} \times C_3$ 為所使用之桶裝瓦斯每公斤的能源成本、 $w_{ijk} \times C_4$ 為所使用之水的每度能源成本。

(1) 電力成本：公式(3)為設備在使用電力時所耗用的耗電度數 \times 每度電的價格。

$$Ce_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times kw_{ijk} \times C_1) \quad (3)$$

(2) 柴油成本：公式(4)為設備在使用柴油時所耗用的柴油公升數 \times 每公升柴油的價格。

$$Co_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times l_{ijk} \times C_2) \quad (4)$$

(3) 瓦斯成本：公式(5)為設備在使用瓦斯時所耗用的瓦斯公斤數 \times 每公斤瓦斯的價格。

$$Cp_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times p_{ijk} \times C_3) \quad (5)$$

(4) 耗水成本：公式(6)為設備在使用水時所用的耗水度數 \times 每度水的價格。

$$Cw_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times w_{ijk} \times C_4) \quad (6)$$

目標函數二：二氧化碳(CO₂)排放量最小化

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_2 &\cong TE_t \\
 &\cong Te_t + To_t + Tp_t + Tw_t \\
 &\cong \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times kw_{ijk} \times E_1) + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times l_{ijk} \times E_2) \\
 &\quad + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times p_{ijk} \times E_3) + (x_{0ijk} \times h_{ijk} \times w_{ijk} \times E_4)
 \end{aligned} \tag{7}$$

中央廚房設備在運作時產生碳排放量，公式(7)為中央廚房的CO₂總排放量，依據不同能源類型，其中kw_{ijk} × E₁為所使用每度電的碳排放量、l_{ijk} × E₂為所使用的柴油每公升的碳排放量、p_{ijk} × E₃為所使用之桶裝瓦斯每公斤的碳排放量、w_{ijk} × E₄為所使用之水的每度碳排放量。

(1) 電力排放CO₂的總量：公式(8)為設備在使用電力時所耗用之耗電度數乘以每度電的碳排放係數。

$$Te_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{0ijk} \times h_{ijk} \times kw_{ijk} \times E_1 \tag{8}$$

(2) 柴油排放CO₂的總量：公式(9)為設備在使用柴油時所耗用之柴油公升數乘以每公升柴油的碳排放係數。

$$To_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{0ijk} \times h_{ijk} \times l_{ijk} \times E_2 \tag{9}$$

(3) 瓦斯排放CO₂的總量：公式(10)為設備在使用瓦斯時所耗用之瓦斯公斤數乘以每公斤瓦斯的碳排放係數。

$$Tp_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{0ijk} \times h_{ijk} \times p_{ijk} \times E_3 \tag{10}$$

(4) 水排放CO₂的總量：公式(11)為設備之耗水度數乘以每度水的碳排放係數。

$$Tw_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{0ijk} \times h_{ijk} \times w_{ijk} \times E_4 \tag{11}$$

在公式(1)與(7)兩個目標函數中，符號“≅”是“=”的模糊版，用來表示各模糊目標函數之期望水準。實務上，決策者在進行中央廚房之設備選擇過程中，決策者面對資訊不完全的緣故，使

得相關的作業係數與決策參數常含有相當程度的不確定性，導致公式(1)與(7)具不精確性的目標函數，且目標函數值可能會因決策者之主觀判斷而異。

限制式：

(1) 需求限制：因應供餐時間，中央廚房內鍋爐與蒸箱每日可作業時間有限，在供餐時間內確保餐點數量可以被滿足，所以餐點供應量必須滿足需求量。

1) 鍋爐需求限制：公式 (12)為鍋爐需求限制，鍋爐所生產的餐點份數不能小於需求量，其中 b_{1jk} 為鍋爐每小時可生產數量、 h_{1jk} 為鍋爐使用時間。

$$\sum_j^J \sum_k^K b_{1jk} \times h_{1jk} \times X_{01jk} \geq D \quad (12)$$

2) 蒸箱需求限制：公式 (13)為蒸箱需求限制，蒸箱所生產的餐點份數 不能小於需求量，其中 s_{2jk} 為蒸箱每小時可生產數量、 h_{2jk} 為蒸箱使用時間。

$$\sum_j^J \sum_k^K s_{2jk} \times h_{2jk} \times X_{02jk} \geq D \quad (13)$$

(2) 設備產能限制：同種設備類型但不同型式、規格之設備的產能限制不同，所以產能必須符合機器之上下限。

1) 鍋爐產能限制：鍋爐每小時產量上限需求。

$$b_{1jk} \times X_{01jk} \leq b_{1jk}^{\max} \quad (14)$$

2) 鍋爐產能限制：鍋爐每小時產量下限需求。

$$b_{1jk} \times X_{01jk} \geq b_{1jk}^{\min} \quad (15)$$

3) 蒸箱產能限制：蒸箱每小時產量上限需求。

$$s_{1jk} \times X_{02jk} \leq s_{1jk}^{\max} \quad (16)$$

4) 蒸箱產能限制：蒸箱每小時產量下限需求

$$s_{1jk} \times X_{02jk} \geq s_{1jk}^{\min} \quad (17)$$

(3) 碳排放限制：在特定時間 t ，溫室氣體需符合管制規範。

$$TE_t \leq Q_t \quad (18)$$

(4) 非負限制：設備數量、設備使用時間均須滿足非負限制。

$$X_{0ijk} \geq 0 \text{ and integer}, i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K \tag{19}$$

3.2 模糊多目標線性規劃模式之求解程序

在模糊理論中，各模糊目標可用各種型式的隸屬函數來表示，隸屬函數包括：線性函數 (Zimmermann, 1978)、區段線性函數 (Hannan, 1981)、非線性函數 (Bhattacharya and Vasant, 2007; Leberling, 1981; Vasant *et al.*, 2003)，其中線性函數與區段線性函數具有較高的求解效率 (Wang and Liang, 2004)，但顧及線性函數型態呈固定遞增或遞減率，有過於簡化。因此本研究採用 Hannan (1981) 模式，該模式以區段線性函數來表示，其優點是能考量決策者對各目標函數之重視程度及偏好順序，較符合實務情況，且利用小中取大運算子組合各目標函數，可將原有多個目標函數線性規劃模式，轉為單目標線性規劃模式求解，計算較簡易且有效率。

Hannan (1981) 模式建構程序如下：

步驟 1：建立各目標函數 z_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 之區段線性隸屬函數 $f_k(z_k)$ ，如表 1 所示。

其中， $0 \leq q_{kn} \leq 1$ 和 $q_{kn} \leq q_{k,n+1}$, $k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N$ 。

步驟 2：繪製 $(z_k, f_k(z_k))$ 關係之區段線性圖型。

步驟 3：將隸屬函數 $f_k(z_k)$ 轉換成為下列形式：

$$f_k(z_k) = \sum_{n=1}^N \alpha_{kn} |z_k - X_{kn}| + \beta_k z_k + \gamma_k \quad k = 1, 2, \dots, K \tag{20}$$

其中， $\alpha_{kn} = \frac{t_{k,n+1} - t_{kn}}{2}$, $\beta_k = \frac{t_{k,N+1} + t_{k1}}{2}$, $\gamma_k = \frac{S_{k,N+1} + S_{k1}}{2}$

每個區段 $X_{k,n-1} \geq z_k \geq X_{kn}$ 中， $f_k(z_k) = t_{kn} z_k + S_{kn}$ ，其中 t_{kn} 為斜率， S_{kn} 為縱軸截距。將其代入公式(20)可得公式(21)與(22)。

表 1 隸屬函數 $f_k(z_k)$

z_1	$> X_{10}$	X_{10}	X_{11}	...	X_{1N}	$X_{1,N+1}$	$< X_{1,N+1}$
$f_1(z_1)$	0	0	q_{11}	...	q_{1N}	1.0	1.0
z_2	$> X_{20}$	X_{20}	X_{21}	...	X_{2N}	$X_{2,N+1}$	$< X_{2,N+1}$
$f_2(z_2)$	0	0	q_{21}	...	q_{2N}	1.0	1.0

$$f_1(z_1) = -\left(\frac{t_{12}-t_{11}}{2}\right)|z_1 - X_{11}| - \left(\frac{t_{13}-t_{12}}{2}\right)|z_1 - X_{12}| - \dots - \left(\frac{t_{1,N+1}-t_{1N}}{2}\right)|z_1 - X_{1N}| + \left(\frac{t_{1,N+1}+t_{11}}{2}\right)z_1 + \frac{S_{1,N+1}+S_{11}}{2} \quad (21)$$

其中， $t_{11} = \left(\frac{q_{11}-0}{X_{11}-X_{10}}\right)$, $t_{12} = \left(\frac{q_{12}-q_{11}}{X_{12}-X_{11}}\right)$, \dots , $t_{1,N+1} = \left(\frac{1.0-q_{1N}}{X_{1,N+1}-X_{1N}}\right)$ 。 $S_{1,N+1}$ 為 X_{1N} 和 $X_{1,N+1}$ 區段之縱軸截距，可由 $f_1(z_1) = t_{1n}z_1 + S_{1n}$ 式導出。

$$f_2(z_2) = -\left(\frac{t_{22}-t_{21}}{2}\right)|z_2 - X_{21}| - \left(\frac{t_{23}-t_{22}}{2}\right)|z_2 - X_{22}| - \dots - \left(\frac{t_{2,N+1}-t_{2N}}{2}\right)|z_2 - X_{2N}| + \left(\frac{t_{2,N+1}+t_{21}}{2}\right)z_2 + \frac{S_{2,N+1}+S_{21}}{2} \quad (22)$$

其中， $t_{21} = \left(\frac{q_{21}-0}{X_{21}-X_{20}}\right)$, $t_{22} = \left(\frac{q_{22}-q_{21}}{X_{22}-X_{21}}\right)$, \dots , $t_{2,N+1} = \left(\frac{1.0-q_{2N}}{X_{2,N+1}-X_{2N}}\right)$ 。 $S_{2,N+1}$ 為 X_{2N} 和 $X_{2,N+1}$ 區段之縱軸截距，可由 $f_2(z_2) = t_{2n}z_2 + S_{2n}$ 式導出。

步驟 3-1：加入非負值離差變數 d_{kn}^+ 與 d_{kn}^- ，並建立目標函數之離差方程式，如下所示：

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{1n}^- - d_{1n}^+ = X_{1n} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (23)$$

$$TE_t + d_{2n}^- - d_{2n}^+ = X_{2n} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

上式中 d_{kn}^+ 和 d_{kn}^- 分別表示正負離差變數， X_{kn} 表示第 k 個目標值在第 n 點之 z_k 值。

步驟 3-2：將公式(23)、(24)代入公式(21)、(22)，即可建立線性隸屬函數 $f_k(z_k)$ 如下：

$$f_1(z_1) = -\left(\frac{t_{12}-t_{11}}{2}\right)(d_{11}^- + d_{11}^+) - \left(\frac{t_{13}-t_{12}}{2}\right)(d_{12}^- + d_{12}^+) - \dots - \left(\frac{t_{1,N+1}-t_{1N}}{2}\right)(d_{1N}^- + d_{1N}^+) + \left(\frac{t_{1,N+1}-t_{11}}{2}\right) \left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t \right\} + \frac{S_{1,N+1}+S_{11}}{2} \quad (25)$$

$$f_2(z_2) = -\left(\frac{t_{22}-t_{21}}{2}\right)(d_{21}^- + d_{21}^+) - \left(\frac{t_{23}-t_{22}}{2}\right)(d_{22}^- + d_{22}^+) - \dots - \left(\frac{t_{2,N+1}-t_{2N}}{2}\right)(d_{2N}^- + d_{2N}^+) + \left(\frac{t_{2,N+1}-t_{21}}{2}\right) \{TE_t\} + \frac{S_{2,N+1}+S_{21}}{2} \quad (26)$$

步驟 4：設定決策者對目標值之滿意度水準 L ，將初始之模糊多目標問題轉換成單一目標函數 $Max L$ ，再重整出模糊多目標線性規劃模式如下，模式詳細的推導程序請參閱附錄 A：

Max L

s.t.

$$L \leq -\left(\frac{t_{12}-t_{11}}{2}\right)(d_{11}^- + d_{11}^+) - \left(\frac{t_{13}-t_{12}}{2}\right)(d_{12}^- + d_{12}^+) - \dots - \left(\frac{t_{1,N+1}-t_{1N}}{2}\right)(d_{1N}^- + d_{1N}^+) + \left(\frac{t_{1,N+1}-t_{11}}{2}\right) \left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t \right\} + \frac{S_{1,N+1} + S_{11}}{2} \tag{27}$$

$$L \leq -\left(\frac{t_{22}-t_{21}}{2}\right)(d_{21}^- + d_{21}^+) - \left(\frac{t_{23}-t_{22}}{2}\right)(d_{22}^- + d_{22}^+) - \dots - \left(\frac{t_{2,N+1}-t_{2N}}{2}\right)(d_{2N}^- + d_{2N}^+) + \left(\frac{t_{2,N+1}-t_{21}}{2}\right) \{TE_t\} + \frac{S_{2,N+1} + S_{21}}{2} \tag{28}$$

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{1n}^- - d_{1n}^+ = X_{1n} \quad n = 1, 2, \dots, N \tag{29}$$

$$TE_t + d_{2n}^- - d_{2n}^+ = X_{2n} \quad n = 1, 2, \dots, N \tag{30}$$

$$\sum_j \sum_k b_{1jk} \times h_{1jk} \times X_{01jk} \geq D \tag{31}$$

$$\sum_j \sum_k s_{2jk} \times h_{2jk} \times X_{02jk} \geq D \tag{32}$$

$$b_{1jk} \times X_{01jk} \leq b_{1jk}^{\max} \tag{33}$$

$$b_{1jk} \times X_{01jk} \geq b_{1jk}^{\min} \tag{34}$$

$$s_{1jk} \times X_{02jk} \leq s_{1jk}^{\max} \tag{35}$$

$$s_{1jk} \times X_{02jk} \geq s_{1jk}^{\min} \tag{36}$$

$$U_{ijk} \times X_{0ijk} \leq CU_t \tag{37}$$

$$TE_t \leq Q_t \tag{38}$$

$$X_{0ijk} \geq 0 \text{ and integer}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad k = 1, 2, \dots, K \tag{39}$$

步驟 5：重覆執行上述步驟，並適時修正相關參數，直到獲得滿意解。

4. 案例分析

4.1 中央廚房主要設備基本資料及相關參數設定

我們以南部某高中學校設置中央廚房設備選擇說明模糊多目標線性規劃模式之應用，並分析其結果，提供決策者面臨多個目標相互衝突時，能得到一組較滿意的結果。個案學校相關資

料如下，廚方面積約為 800 平方公尺，設備規劃期為 10 年，供餐人數為 1000 人，每年供餐 200 天，設備每日使用時間為上午 8：30~11：00。由於中央廚房內設備相當多，本研究僅針對高耗能設備鍋爐、蒸箱、排油煙機、冰箱與洗碗機進行分析與探討，設備耗能以電力、瓦斯、柴油、水為主。中央廚房內高耗能設備有多種類型、型式、規格，表 2 至表 7 為鍋爐、蒸箱、排油煙機、冰箱與洗碗機的參數設定。

4.2 初始模式測試結果分析

首先根據多目標規劃模式對目標函數一(總成本極小化)進行求解，其次再求解目標函數二(碳排放總量極小化)。

4.2.1 目標函數一初始測試結果分析

在總成本極小化為目標，且滿足所有限制條件下，求出最適之設備組合。其中總成本 Z_1 為 1,725,147 元，設備碳排放量 Z_2 為 278,205 kgCO₂e，表 8 與表 9 分別為設備組合、設備規格與數量。

表 2 鍋爐參數

類型	型式	規格 (蒸發量) (公斤)	購入 成本 (元)	安裝 成本 (元)	維護 成本 (元/次)	維護 次數 (次/年)	使用 時間 (hr/天)	設備每小時耗用能源量			
								電力 (w)	柴油 (L)	瓦斯 (kg)	水 (L)
鍋爐	瓦斯	1800	161700	8000	5000	4	2.5	4500	0	27	164
		1200	118800	8000	5000	4	2.5	3600	0	23	145
		750	107800	7000	4000	4	2.5	2700	0	16.5	120
		500	94600	6000	4000	4	2.5	1900	0	13.5	89
	燃油	2000	97000	6000	4000	4	2.5	5650	26.2	0	145
		1500	77000	6000	4000	4	2.5	4900	22.7	0	120
		800	67000	5000	3500	4	2.5	3880	18.3	0	89
		600	53000	5000	3500	4	2.5	2900	12.5	0	66

表 3 蒸箱參數

類型	型式	規格 (層數) (層)	購入 成本 (元)	安裝 成本 (元)	維護 成本 (元/次)	維護 次數 (次/年)	使用 時間 (hr/天)	設備每小時耗用能源量			
								電力 (w)	柴油 (L)	瓦斯 (kg)	水 (L)
蒸箱	電力	26	80500	4000	3000	4	1	4300	0	0	292
		22	71300	4000	3000	4	1	3500	0	0	240
		18	57500	3000	2500	4	1	2900	0	0	107
		12	48300	3000	2500	4	1	2300	0	0	85
	瓦斯	24	57000	5000	3600	4	1	2500	0	8.3	320
		20	46000	5000	3400	4	1	2200	0	7.2	280
		16	35000	4000	3200	4	1	1750	0	5.6	227
		10	30000	3600	2700	4	1	1200	0	4.5	192

表 4 冰箱參數

類型	型式	規格 (容量) (L)	購入 成本 (元)	安裝 成本 (元)	維護 成本 (元/次)	維護 次數 (次/年)	使用 時間 (hr/天)	設備每小時耗用能源量			
								電力 (w)	柴油 (L)	瓦斯 (kg)	水 (L)
冰箱	四門	1480	46000	3700	1800	3	24	1300	0	0	0
		1200	42000	3700	1600	3	24	1150	0	0	0
		1000	30000	3200	1600	3	24	800	0	0	0
		800	28000	3000	1300	3	24	650	0	0	0
	雙門	970	38000	2200	1500	3	24	1100	0	0	0
		820	33000	2000	1300	3	24	750	0	0	0
		720	25300	1800	1200	3	24	600	0	0	0
		600	23000	1500	1100	3	24	500	0	0	0

表 5 排油煙機參數

類型	型式	規格 (排風量) (CFM)	購入 成本 (元)	安裝 成本 (元)	維護 成本 (元/次)	維護 次數 (次/年)	使用 時間 (hr/天)	設備每小時耗用能源量			
								電力 (w)	柴油 (L)	瓦斯 (kg)	水 (L)
排油 煙機	靜電	8100	180000	35000	3200	2	1	500	0	0	0
		5000	165000	35000	3000	2	1	400	0	0	0
		3000	140000	30000	2700	2	1	320	0	0	0
		2100	120000	25000	2700	2	1	250	0	0	0
	水洗	6000	100000	22000	2500	5	1	916	0	0	22.87
		4500	93000	22000	2400	5	1	852	0	0	19.62
		2500	80000	20000	2200	5	1	720	0	0	18.6
		1500	70000	20000	2000	5	1	625	0	0	15.4

表 6 洗碗機參數

類型	型式	規格 (容量) (份)	購入 成本 (元)	安裝 成本 (元)	維護 成本 (元/次)	維護 次數 (次/年)	使用 時間 (hr/天)	設備每小時耗用能源量			
								電力 (w)	柴油 (L)	瓦斯 (kg)	水 (L)
洗碗 機	電力	400	120000	5000	3500	3	1	36380	0	0	720
		360	110000	4400	3300	3	1	37500	0	0	900
		270	100000	4000	3000	3	1	40880	0	0	900
		210	85000	3500	3000	3	1	46125	0	0	1200
	瓦斯	460	175000	7000	4500	2	1	9760	0	3	720
		420	162000	6000	4200	2	1	13875	0	3	900
		360	150000	5000	3800	2	1	16500	0	5.03	900
		280	135000	4300	3500	2	1	23260	0	6	1200

表 7 中央廚房主要設備產能限制

類型	鍋爐							
型式	瓦斯				燃油			
規格(公斤)	1800	1200	750	500	2000	1500	800	600
產能上限(份)	360	320	230	170	350	250	180	150
產能下限(份)	330	290	200	140	310	210	140	120
類型	蒸箱							
型式	電子				瓦斯			
規格(層數)	26	22	18	12	24	20	16	10
產能上限(份)	350	300	260	220	400	360	280	190
產能下限(份)	320	270	230	190	360	330	240	150

表 8 目標—總成本極小化之設備組合

設備類型	鍋爐		蒸箱		冰箱		排油煙機		洗碗機	
設備型式	瓦斯	燃油	電子	瓦斯	四門	雙門	靜電	水洗	瓦斯	電力
設 1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0
備 2	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
規 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
格 4	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
總成本 (元)：1,725,147										
碳排放量 (kgCO ₂ e)：278,205										

表 9 目標—總成本極小化之設備規格與數量

設備類型	設備型式	設備規格	設備數量
鍋爐	燃油型	500 (kg)	1
		300 (kg)	1
蒸箱	瓦斯型	24(層)	1
		20(層)	1
冰箱	四門	1200 (L)	1
		雙門	720 (L)
排油煙機	水洗式	4500 (CFM)	1
		1500 (CFM)	1
洗碗機	瓦斯式	400 (份)	2
		210 (份)	1

在總成本極小化之目標下研究發現，蒸箱與洗碗機兩項設備所選之能源型式均為瓦斯型，鍋爐選擇燃油型式，冰箱型式為四門冰箱與雙門冰箱混合選擇，排油煙機型式則為水洗式排油煙機。

4.2.2 目標函數二初始測試結果分析

在碳排放量極小化為目標，且滿足所有限制條件下，求出最適之設備組合。其中總成本 Z_1 為 2,088,352 元，設備碳排放量 Z_2 為 224,155 kgCO₂e，表 10 與表 11 分別為設備組合、設備規格與數量。

在碳排放量極小化之目標下研究發現，鍋爐所選之型式為瓦斯型鍋爐，蒸箱與洗碗機之型式為電力式，冰箱型式則為雙門冰箱，排油煙機所選之型式為靜電式排油煙機。

4.3 模糊多目標模式結果分析

本研究建構多目標規劃模式，運用模糊集理論並結合 Hannan (1981) 模式，轉換為模糊多目標規劃模式。該模式目標函數之隸屬函數採用區段線性函數型態，能顧及決策者對各目標函數之重視程度及偏好順序，且利用小中取大運算子組合各目標函數，並將原有多目標函數線性規劃模式轉為單目標線性規劃模式求解。Hannan (1981) 模式求解分為五個步驟如下：

步驟 1：建立目標函數 z_1 與 z_2 之隸屬函數 $f_1(z_1)$ 與 $f_2(z_2)$ ，如表 12 所示。

表 10 目標二碳排放量極小化之設備組合

設備類型	鍋爐		蒸箱		冰箱		排油煙機		洗碗機	
設備型式	瓦斯	燃油	電子	瓦斯	四門	雙門	靜電	水洗	瓦斯	電力
設備 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
設備 2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
規格 3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
規格 4	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
設備總成本 (元)：2,088,352										
設備碳排放量 (kgCO ₂ e)：224,155										

表 11 目標二碳排放量極小化之設備規格與數量

設備類型	設備型式	設備規格	設備數量
鍋爐	瓦斯型	650(kg)	1
		400 (kg)	1
蒸箱	電力型	22(層)	1
		18(層)	1
		12(層)	1
冰箱	雙門	970 (L)	1
		820 (L)	1
排油煙機	靜電式	3000 (CFM)	1
		2100 (CFM)	1
洗碗機	電力型	360 (份)	2
		280 (份)	1

表 12 隸屬函數 $f_k(z_k)$

z_1	≥ 2160000	2030000	1900000	≤ 1770000
$f_1(z_1)$	0	0.5	0.8	1.0
z_2	≥ 290000	270000	250000	≤ 230000
$f_2(z_2)$	0	0.5	0.8	1.0

步驟 2：繪製 $(z_1, f_1(z_1))$ 與 $(z_2, f_2(z_2))$ 之關係圖，如圖 2 與圖 3。

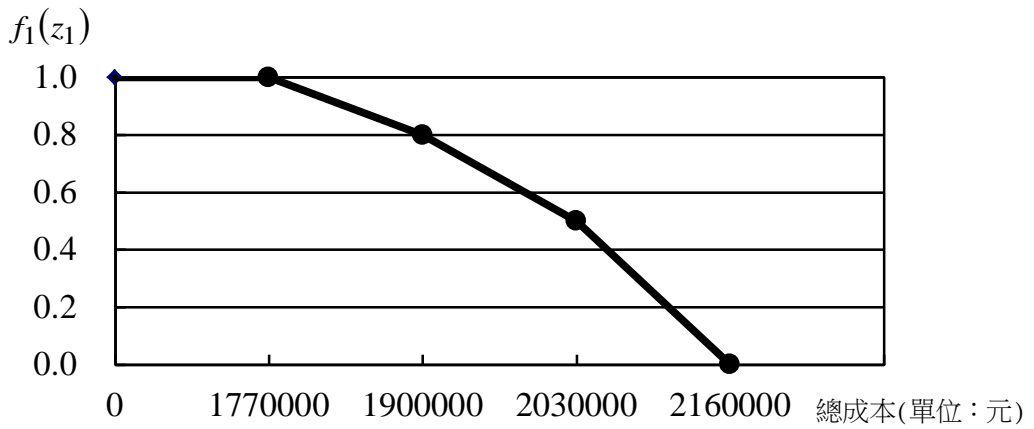


圖 2 隸屬函數 $(Z_1, f_1(z_1))$ 關係

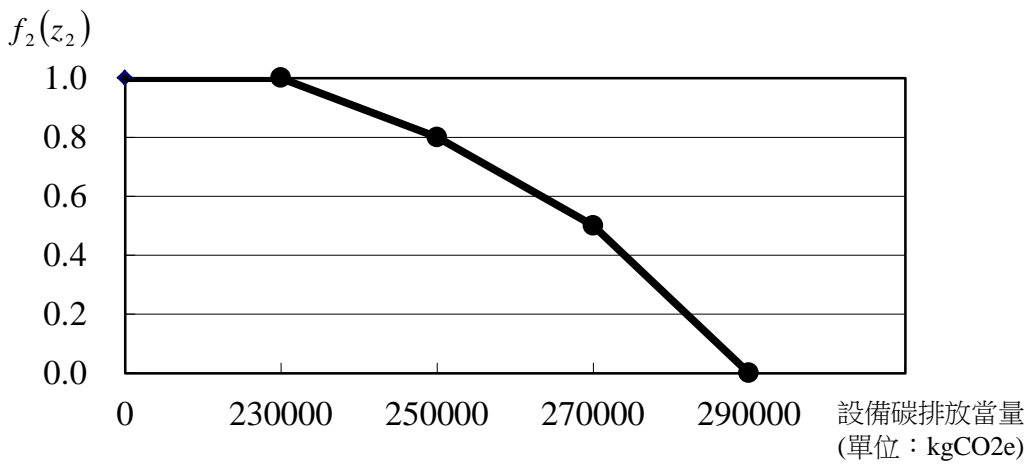


圖 3 隸屬函數 $(Z_2, f_2(z_2))$ 關係

步驟 3：將隸屬函數 $f_1(z_1)$ 與 $f_2(z_2)$ 轉換成下列區段線性函數：

$$f_1(z_1) = -0.000000769|z_1 - 2030000| - 0.00000038|z_1 - 1900000| - 0.000002692z_1 + 6.0154 \quad (40)$$

$$f_2(z_2) = -0.0000005|z_2 - 270000| - 0.0000025|z_2 - 250000| - 0.0000175z_2 + 5.275 \quad (41)$$

步驟 4：加入非負值離差變數 d_{kn}^+ 與 d_{kn}^- ，並建立目標函數之離差方程式，如下所示：

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{11}^- - d_{11}^+ = 2030000 \quad (42)$$

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{12}^- - d_{12}^+ = 1900000 \quad (43)$$

$$TE_t + d_{21}^- - d_{21}^+ = 270000 \quad (44)$$

$$TE_t + d_{22}^- - d_{22}^+ = 250000 \quad (45)$$

步驟 5：將公式(42)、(43)、(44)、(45)代入公式(40)、(41)，即可建立區段線性隸屬函數 $f_1(z_1)$ 與 $f_2(z_2)$ 如下：

$$f_1(z_1) = -0.000000769(d_{11}^- - d_{11}^+) - 0.00000038(d_{12}^- - d_{12}^+) - 0.000002692 \left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t \right\} + 6.0154 \quad (46)$$

$$f_2(z_2) = -0.0000005(d_{21}^- - d_{21}^+) - 0.0000025(d_{22}^- - d_{22}^+) - 0.0000175\{TE_t\} + 5.275 \quad (47)$$

步驟 6：加入一個輔助變數 L ， L 值是衡量決策者對目標值之滿意度水準，其中 $0 \leq L \leq 1$ ，並以最小運算子整合各模糊集，將初始之模糊多目標問題轉換成一般的單目標 LP 模式 ($Max L$)，得到模糊多目標線性規劃模式如下：

$Max L$

s.t.

$$L \leq -0.000000769(d_{11}^- - d_{11}^+) - 0.00000038(d_{12}^- - d_{12}^+) - 0.000002692$$

$$\left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t \right\} + 6.0154$$

$$L \leq -0.0000005(d_{21}^- - d_{21}^+) - 0.0000025(d_{22}^- - d_{22}^+) - 0.0000175\{TE_t\} + 5.275$$

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{11}^- - d_{11}^+ = 2030000$$

$$\sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(CF_{0ijk} + F_{0ijk}) + (M_t \times N_t)] \times X_{0ijk} + CE_t + d_{12}^- - d_{12}^+ = 1900000$$

$$\begin{aligned}
TE_t + d_{21}^- - d_{21}^+ &= 270000 \\
TE_t + d_{22}^- - d_{22}^+ &= 250000 \\
\sum_j^J \sum_k^K b_{1jk} \times h_{1jk} \times X_{01jk} &\geq D \\
\sum_j^J \sum_k^K s_{2jk} \times h_{2jk} \times X_{02jk} &\geq D \\
b_{1jk} \times X_{01jk} &\leq b_{1jk}^{\max} \\
b_{1jk} \times X_{01jk} &\geq b_{1jk}^{\min} \\
s_{1jk} \times X_{02jk} &\geq s_{1jk}^{\max} \\
s_{1jk} \times X_{02jk} &\geq s_{1jk}^{\min} \\
U_{ijk} \times X_{ijk} &\geq CU_t \\
TE_t &\leq Q_t
\end{aligned}$$

$$X_{0ijk} \geq 0 \text{ and integer, } i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K$$

$$d_{11}^- \geq 0, d_{11}^+ \geq 0, d_{12}^- \geq 0, d_{12}^+ \geq 0, d_{21}^- \geq 0, d_{21}^+ \geq 0, d_{22}^- \geq 0, d_{22}^+ \geq 0,$$

其中， d_{11}^+ 、 d_{11}^- 、 d_{12}^+ 及 d_{12}^- 分別表示第 1 個目標函數在第 1 個區段點及第 2 個區段點的非負離差變數； d_{21}^+ 、 d_{21}^- 、 d_{22}^+ 及 d_{22}^- 分別表示第 2 個目標函數在第 1 個區段點及第 2 個區段點的非負離差變數。

步驟 7：執行上述之模糊多目標線性規劃模式，可獲得一組起始解。若決策者對此一起始解不滿意，可根據實際情況或經驗判斷，進一步修正相關係數與決策參數，直至獲得滿意解為止。

本研究將上述問題利用 Lingo 10.0 軟體進行求解，得到總成本 Z_1 為 1,856,887 元，碳排放總量 Z_2 為 235,816 kgCO₂e，決策者滿意度為 87.0%。表 13 為案例學校求得模糊多目標規劃模式之輸出解。

本研究針對單目標與模糊多目標進行比較分析，在不考慮碳排放量的情況下，以 LP 模式求解第一個目標 (LP-1)，其最佳解 $z_1 = 1725147$ 元；在不考慮總成本的情況下，以 LP 模式求解第二個目標 (LP-2)，其最佳解 $z_2 = 224155$ kgCO₂e；同時考慮第一個目標與第二個目標，利用模糊多目標規劃模式求解，其 Z_1 總成本為 1856887 元， Z_2 碳排放量為 235816 kgCO₂e，決策者滿意度為 87%，如表 14 所示。

表 13 模糊多目標規劃之決策變數、目標值及滿意度

設備類型	模糊多目標規劃									
	鍋爐		蒸箱		冰箱		排油煙機		洗碗機	
設備型式	瓦斯	燃油	電子	瓦斯	四門	雙門	靜電	水洗	瓦斯	電力
設	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
備	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0
規	3	1	0	1	0	1	0	0	0	0
格	4	1	0	1	0	1	0	1	1	0
設備總成本 (元) : 1,856,887										
設備碳排放量 (kgCO ₂ e) : 235,816										
滿意度 (%) : 87										

表 14 單一目標與模糊多目標之結果比較

	LP-1	LP-2	模糊多目標規劃
z_1	1725147	2088352	1856887
z_2	278205	224155	235816
L	100 %	100 %	87 %

研究發現，因模糊多目標規劃求出的解($z_1 = 1856887$ 元， $z_2 = 235816$ kgCO₂e)，介於 LP-1 與 LP-2 二個單一目標最佳解之間，明確地顯示模糊多目標規劃解是一組令決策者感到滿意的解，其結果較符合實務的規劃情況。

5. 結論

現今多數高中（職）學校設置中央廚房較不普及，為了解決中央廚房設備選擇問題，同時兼顧低成本與低碳二個目標，應利用模糊集理論來因應資訊不精確所產生的模糊多目標規劃問題。因此本研究利用模糊多目標規劃法，建構一個中央廚房設備選擇之最佳化決策模式，該模式考量中央廚房設備購買成本、安裝成本、維護成本與設備能源成本，及設備使用年限與設備的碳排放量，同時達到設備總成本最小化與二氧化碳排放量最小化為目標。從模糊多目標的求解結果得知，由於各模糊目標函數間存在相互衝突的性質，造成目標間產生權衡取舍關係。為兼顧低成本與低碳二個目標，本模式可適時提供決策者一個有效的滿意解，且可依照決策者的實務需求進行參數調整與設定，較符合實務上決策多元目標的需求，作為中央廚房設備選擇之決策參考。本研究所提出之模式未來可擴充應用在高耗能產業進行設備選擇，例如：石化、水泥或鋼鐵等產業之應用。

附錄 A 模糊多目標模式之推導

本研究採用 Hannan (1981) 模式，將多目標線性規劃模式轉成模糊多目標線性規劃模式，模式建構程序如下：

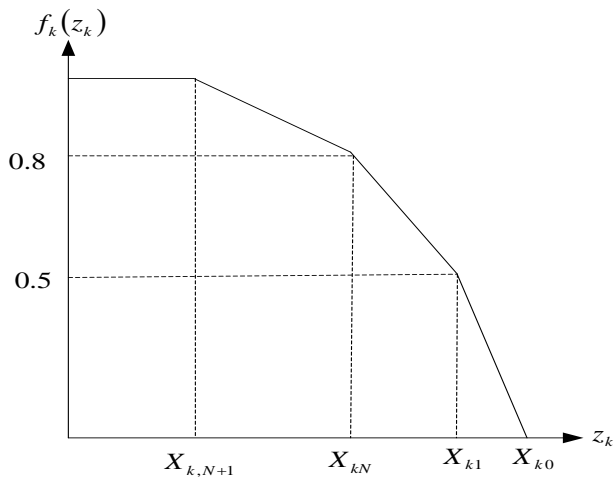
步驟 1：建立各目標函數 $z_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 之區段線性隸屬函數 $f_k(z_k)$ ，如附表 1 所示。

附表 1 隸屬函數 $f_k(z_k)$

z_1	$> X_{10}$	X_{10}	X_{11}	...	X_{1N}	$X_{1,N+1}$	$< X_{1,N+1}$
$f_1(z_1)$	0	0	q_{11}	...	q_{1N}	1.0	1.0
z_2	$> X_{20}$	X_{20}	X_{21}	...	X_{2N}	$X_{2,N+1}$	$< X_{2,N+1}$
$f_2(z_2)$	0	0	q_{21}	...	q_{2N}	1.0	1.0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
z_k	$> X_{k0}$	X_{k0}	X_{k1}	...	X_{kN}	$X_{k,N+1}$	$< X_{k,N+1}$
$f_k(z_k)$	0	0	q_{k1}	...	q_{kN}	1.0	1.0

其中， $0 \leq q_{kn} \leq 1.0$ 和 $q_{kn} \leq q_{k,n+1}, k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N$

步驟 2：繪製 $(z_k, f_k(z_k))$ 關係之區段線性圖形。



附圖 1 區段線性圖形

步驟 3：將隸屬函數 $f_k(z_k)$ 轉換成為下列形式：

$$f_k(z_k) = \sum_{n=1}^N \alpha_{kn} |z_k - X_{kn}| + \beta_k z_k + \gamma_k \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (A1)$$

上式中， $\alpha_{kn} = -\frac{t_{k,n+1} - t_{kn}}{2}$ ， $\beta_k = \frac{t_{k,N+1} + t_{k1}}{2}$ ， $\gamma_k = \frac{S_{k,N+1} + S_{k1}}{2}$

在每個區段 $X_{k,n-1} \leq z_k \leq X_{kn}$ 中， $f_k(z_k) = t_{kn}z_k + S_{kn}$ ，其中 t_{kn} 為斜率， S_{kn} 為縱軸截距。將其代入公式(A1)可得：

$$f_k(z_k) = -\left(\frac{t_{k2} - t_{k1}}{2}\right)|z_k - X_{k1}| - \left(\frac{t_{k3} - t_{k2}}{2}\right)|z_k - X_{k2}| - \dots - \left(\frac{t_{k,N+1} - t_{kN}}{2}\right)|z_k - X_{kN}| + \left(\frac{t_{k,N+1} + t_{k1}}{2}\right)z_k + \frac{S_{k,N+1} + S_{k1}}{2} \quad \left(\frac{t_{1,n+1} - t_{1n}}{2}\right) \neq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (A2)$$

上式中， $t_{k1} = \left(\frac{q_{k1} - 0}{X_{k1} - X_{k0}}\right)$ ， $t_{k2} = \left(\frac{q_{k2} - q_{k1}}{X_{k2} - X_{k1}}\right)$ ， \dots ， $t_{k,N+1} = \left(\frac{1.0 - q_{kN}}{X_{k,N+1} - X_{kN}}\right)$ ， $S_{k,N+1}$ 為 X_{1N} 和 $X_{1,N+1}$ 區段之縱軸截距，可由 $f_k(z_k) = t_{kr}z_k + s_{kr}$ 式導出。

步驟 3-1：加入非負值離差變數 d_{kn}^+ 與 d_{kn}^- ，並建立目標函數之離差方程式，如下所示：

$$z_k + d_{kn}^- - d_{kn}^+ = X_{kn} \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (A3)$$

上式中 d_{kn}^+ 和 d_{kn}^- 分別表示第 k 個目標函數在第 n 個區段點的非負離差變數。

步驟 3-2：將公式(A3)代入公式(A2)中，可建立線性隸屬函數 $f_k(z_k)$ 如下：

$$f_k(z_k) = -\left(\frac{t_{k2} - t_{k1}}{2}\right)(d_{k1}^- + d_{k1}^+) - \left(\frac{t_{k3} - t_{k2}}{2}\right)(d_{k2}^- + d_{k2}^+) - \dots - \left(\frac{t_{k,N+1} - t_{kN}}{2}\right)(d_{kN}^- + d_{kN}^+) + \left(\frac{t_{k,N+1} + t_{k1}}{2}\right)z_k + \frac{S_{k,N+1} + S_{k1}}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (A4)$$

步驟 4：加入一個輔助變數 L ， L 值是衡量決策者對目標值之滿意度水準，其中 $0 \leq L \leq 1$ ，並以最小運算子整合各模糊集，將初始之模糊多目標問題轉換成一般的單目標 LP 模式 ($Max L$)，得到模糊多目標線性規劃模式如下：

$\max L$

s.t.

$$L \leq -\left(\frac{t_{k2} - t_{k1}}{2}\right)(d_{11}^- - d_{11}^+) - \left(\frac{t_{k3} - t_{k2}}{2}\right)(d_{12}^- - d_{12}^+) - \dots - \left(\frac{t_{k,N+1} - t_{kN}}{2}\right)(d_{kN}^- - d_{kN}^+) \\ + \left(\frac{t_{k,N+1} + t_{k1}}{2}\right)z_k + \frac{S_{k,N+1} + S_{k1}}{2} \quad \forall k \\ z_k + d_{kn}^- - d_{kn}^+ = X_{kn} \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

Equations (12)-(19)

$$d_{kn}^- \geq 0, d_{kn}^+ \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

步驟 5：執行上述之模糊多目標線性規劃模式，可獲得一組起始解。若決策者對此一起始解不滿意，可根據實際情況或經驗判斷，進一步修正相關係數與決策參數，直至獲得滿意解為止。

參考文獻

- 王泰裕，「模糊環境下先進製造設備選購之多目標規劃」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，民國90年。
- 王克隆，「自動倉儲系統選擇的決策分析-單元負載式與流動式之比較」，國立高雄第一科技大學運籌管理系未出版碩士論文，民國97年。
- 余孟修，「模糊多準則決策方法評選TFT-LCD黃光製程之濕式機台」，元智大學工業工程與管理學系未出版碩士論文，民國100年。
- 邵亭芬，「台灣地區半導體後段設備供應商評選決策之研究」，國立交通大學管理學院碩士在職專班管理科學組未出版碩士論文，民國98年。
- 董中浪，「物流設備選擇方法」，物流技術與戰略，第一期，民國92年，9-13頁。
- 管培智，「多目標規劃教學設備投資決策分析-以空軍航空技術學院為例」，義守大學工業工程與管理學系未出版碩士論文，民國91年。
- 鄧玉珮，「應用模糊多準則決策於遴選TFT-LCD點燈設備商之研究」，元智大學工業工程與管理學系未出版碩士論文，民國97年。
- Bellman, R. E. and Zadeh, L. A., "Decision-Making in A Fuzzy Environment," *Management Science*, Vol. 17, No. 4, 1970, pp.141-164.
- Bhattacharya, A. and Vasant, P. M., "Soft-Sensing of Level of Satisfaction in TOC Product-Mix

- Decision Heuristic Using Robust Fuzzy-LP,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 1, 2007, pp. 55-70.
- Borges, A. R. and Antunes, C. H., “A Weight Space-Based Approach to Fuzzy Multiple-Objective Linear Programming,” *Decision Support Systems*, Vol. 34, No. 4, 2003, pp.427-443.
- Cao, D., Chen, M., and Wan, G., “Parallel Machine Selection and Job Scheduling to Minimize Machine Cost and Job Tardiness,” *Computers & Operations Research*, Vol. 32, No. 8, 2005, pp.1995-2012.
- Chtourou, H., Masmoudi, W., and Maalej, A., “An Expert System for Manufacturing Systems Machine Selection,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 28, No. 3, 2005, pp.461-467.
- Durán, O. and Aguilo, J., “Computer-Aided Machine-Tool Selection Based on a Fuzzy-AHP Approach,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 34, No. 3, 2008, pp.1787-1794.
- Fatahi, E., Jalalifar, H., Pourafshari, P., and Moradi, B., “Selection of the Best Artificial Lift Method for One of the Iranian Oil Field Using Multiple Attribute Decision Making Methods,” *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp.188-194.
- Fonseca, D. J., Uppal, G., and Greene, T. J., “A Knowledge-Based System for Conveyor Equipment Selection,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 26, No. 4, 2004, pp.615-623.
- Hannan, E. L., “Linear Programming with Multiple Fuzzy Goals,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.6, No. 3, 1981, pp.235-248.
- Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, pringer-Verlag, Berlin, 1981.
- Kazarian, E. A., *Food service Facilities Planning*, New York: John Wiley & Sons Inc, 1976.
- Kulak O., Durmuşoğlu, M. B., and Kahraman, C., “Fuzzy Multi-Attribute Equipment Selection Based on Information Axiom,” *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 169, No. 3, 2005, pp.337-345.
- Kulak, O., “A Decision Support System for Fuzzy Multi-Attribute Selection of Material Handling Equipments,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 29, No. 2, 2005, pp.310-319.
- Leberling, H., “On Finding Compromise Solutions in Multicriteria Problems Using the Fuzzy Min-Operator,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 6, No. 2, 1981, pp.105-118.
- Liang, T. F., “Distribution Planning Decisions Using Interactive Fuzzy Multi-Objective Linear Programming,” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 157, No. 10, 2006, pp.1303-1316.
- Lin, Z. C. and Yang, C. B., “Evaluation of Machine Selection by the AHP Method,” *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 57, No. 3-4, 1996, pp.253-358.

- Mahdavi I., Shirazi, B., and Sahebjamnia, N., "Development of A Simulation-Based Optimisation for Controlling Operation Allocation and Material Handling Equipment Selection in FMS," *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No. 23, 2011, pp.6981-7005.
- Özdemir, R. G. and Ayağ, Z., "An Integrated Approach to Evaluating Assembly-Line Design Alternatives with Equipment Selection," *Production Planning & Control*, Vol. 22, No. 2, 2011, pp.194-206.
- Paramasivam, V., Senthil, V., and Ramasamy, N.R., "Decision Making in Equipment Selection: An Integrated Approach with Digraph and Matrix Approach, AHP and ANP," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No.9-12, 2011, pp.1233-1244.
- Peidroa, D. and Vasant, P., "Transportation Planning with Modified S-curve Membership Functions Using An Interactive Fuzzy Multi-Objective Approach," *Applied Soft Computing*, Vol. 11, No. 2, 2011, pp.2626-2663.
- Poon, T. C., Choy, K. L., Cheng, C. K., Lao, S. I., and Lam, H.Y., "Effective Selection and Allocation of Material Handling Equipment for Stochastic Production Material Demand Problems Using Genetic Algorithm," *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 10, 2011, pp.12497-12505.
- Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., and Özgen, D., "An Integrated Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methodology for Material Handling Equipment Selection Problem and An Application," *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 4, 2010, pp.2853-2863.
- Vasant, P. M., Nagarajan, R., and Yaacob, S., "Decision Making Using Modified S-cure Membership Function in Fuzzy Linear Programming Problem," *Journal of Information and Communication Technology*, Vol. 1, No. 2, 2003, pp.1-16.
- Wang, R.C. and Liang, T.F., "Application of Fuzzy Multi-Objective Linear Programming to Aggregate Production Planning," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 46, No. 1, 2004, pp. 17-41.
- Zadeh, L. A., "Fuzzy Set," *Information and Control*, Vol. 8, No. 3, 1965, pp.38-53.
- Zarifov, B. S., Khabotov, E. N., and Shaidullin, R. A., "Equipment Selection Models for Oil Mixing Systems," *Automation and Remote Control*, Vol. 72, No. 4, 2011, pp. 166-180.
- Zimmermann, H. J., "Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, 1978, pp.45-56.