

摘 要

食品工業常被歸類為高能量消耗產品，因而對生態環境造成衝擊。在此環保問題日受關切的時代，如何生產省資源、省能源、低污染的綠色食品，將會是食品工業重要的發展策略。本計畫為「果蔬汁產品綠色度之研究」三年計畫第三年總計畫之中的一個子計畫。本研究在接續上一年度探討果汁產品在不同的加工包裝過程能源利用的效率。分析的果汁產品包括：柳橙汁、番石榴汁、楊桃汁與蕃茄汁等四種；加工包裝程序有原汁加工、熱充填包裝、冷藏包裝與無菌包裝。在研究中使用有效能分析法，以產品在製造程序中單位重量的不可逆能的產生量為果汁綠色度的指標。這種方法考慮製造程序中能源的使用效率，而不是單純的總使用量，使不同的生產程序或食品產品可以有一個共同的比較標準。研究中發現在加工果汁的程序上，熱充填包裝單位重量產品產生的不可逆能最少，而後無菌包裝、冷藏包裝依序增加。但是在分析產品差異時，所研究的四種果汁並沒有明顯的差異。研究中並考慮改善綠色度的方法，殺菌加工時利用高溫的殺菌果汁以熱交換器加熱低溫的進料是最有效的方法。提高熱交換的熱能交換效率，可以有效的降低不可逆能的產生，進而提高果汁產品的綠色度。研究中發現在加工果汁的程序上，熱殺菌過程是主要的能量消耗程序。提高熱交換的熱能交換效率，可以有效的降低不可逆能的產生，進而提高果汁產品的綠色度。在研究中評估各種設計的熱交換器，討論殺菌溫度、蒸汽溫度、冷卻水溫度等對熱交換單位(NTU)與有效能損失的影響。研究中的發現建立一個熱交換器的評估方法可以提供產業進一步的應用。

關鍵字：果汁、蔬菜汁、綠色食品、包裝、能源、資源。

ABSTRACT

To consume foods with high greenness is helpful to sustaining resources and protecting the environment. This project is a sub-project of the first-year part “Mass Flow and Energy Utilization in the Life Cycle of Fruit and Vegetable Juice Products” in a three-year project entitled “The Greenness in Fruit and Vegetable Juice products”. Food processes considered being energy intensive industry. To label a processed food product as a green product, the life cycle assessments of energy must be considered. In previous study four fruit juice products mainly orange juice, guava juice, carambola juice, and tomato juice prepared from four different production processes were analyzed. Production processes studied include raw juice processing, refrigerated packing, aseptic processing, and hot filling. Exergy analysis was carried in the study. Energy efficiency instead of total amount of energy used in the production was considered in the study method, which gives a fair base when energy consumption of different processed products was compared. Thermal processing was the major energy consuming process. Thermal energy regeneration was found to be an effective mean to decrease irreversible energy, thus increase the greenness of fruit juice product. To improve heat exchanging efficiency could reduce exergy loss thus increase greenness of fruit juices. The energy efficiency could be improved by using a well design heat exchanger. Various designs of heat exchangers were evaluated in the study, exergy loss and NTU (number of transfer unit) for each cases very compared. Some good design practices were suggested for future applications.

Keywords: juice, vegetable juice, green food, packaging, energy, resource.

目 錄

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 錄	III
一、 前言	1
二、 方法	3
(一) 系統的界定	3
(二) 製造流程子系統	4
(三) 製冷系統	5
(四) 有效能與不可逆能	7
(五) 果蔬汁製程的不可逆能	9
(六) 熱交換器的設計與分析	10
(七) 蒸汽的產生與製冷	19
三、 結果與討論	22
(一) 殺菌溫度的效應	22
(二) 蒸汽溫度的效應	25
(三) 冷卻溫度效應	27
(四) 再生熱交換器效應	29
四、 結論與建議	33
五、 參考文獻	34

一、前言

能源的有效利用是改進果汁產品的綠色度的方法之一，在加工過程中能源的使用是必需的，但是如何使用才是最有效是一個值得探討的問題。在本計畫的整體計畫於第一年中完成果汁產品非生物性資源利用的調查，發現殺菌加熱耗費最大的能量。第二年建立所調查製程不可逆能的產生，便建議已不可逆能的產生量作為綠色產品的一種參考指標。本研究將進而探討如何改善熱交換設備的設計以提高能量利用的效率，在考量設備投資成本下如何降低不可逆能的產生，加強能源利用效率，以減低對環境衝擊，提高果汁的綠色度。

傳統上能源利用以熱力學第一定律作為分析的基礎去探討製造程序所需消耗的能量，但是這種分析往往不能看出所使用能量的效率。在 70 年代能源危機後，能源使用效率的分析大被重視。有效能(exergy)分析被廣泛的用在各種產業能源利用的研究之上。這種分析方法綜合熱力學第一與第二定律，訂定一個能量品質的指標，將能量分為可以使用的有效能與不可使用的不可逆能(irreversability)或稱不可逆能。由於能量是守恆的，在製造程序中能量只是進行交換與轉換，其總量並不減少，但是在這些不可逆的程序中，高有效能的優值能量因為製程的不可逆而產生熵，有效能變成不可逆能，因而使能量變為低有效能高不可逆能的劣值形態。有效能分析可以了解在製造程序中，不可逆能產生的單元，因而改善其能源使用效率；或是發覺廢熱排放內的有效能，進而再利用。

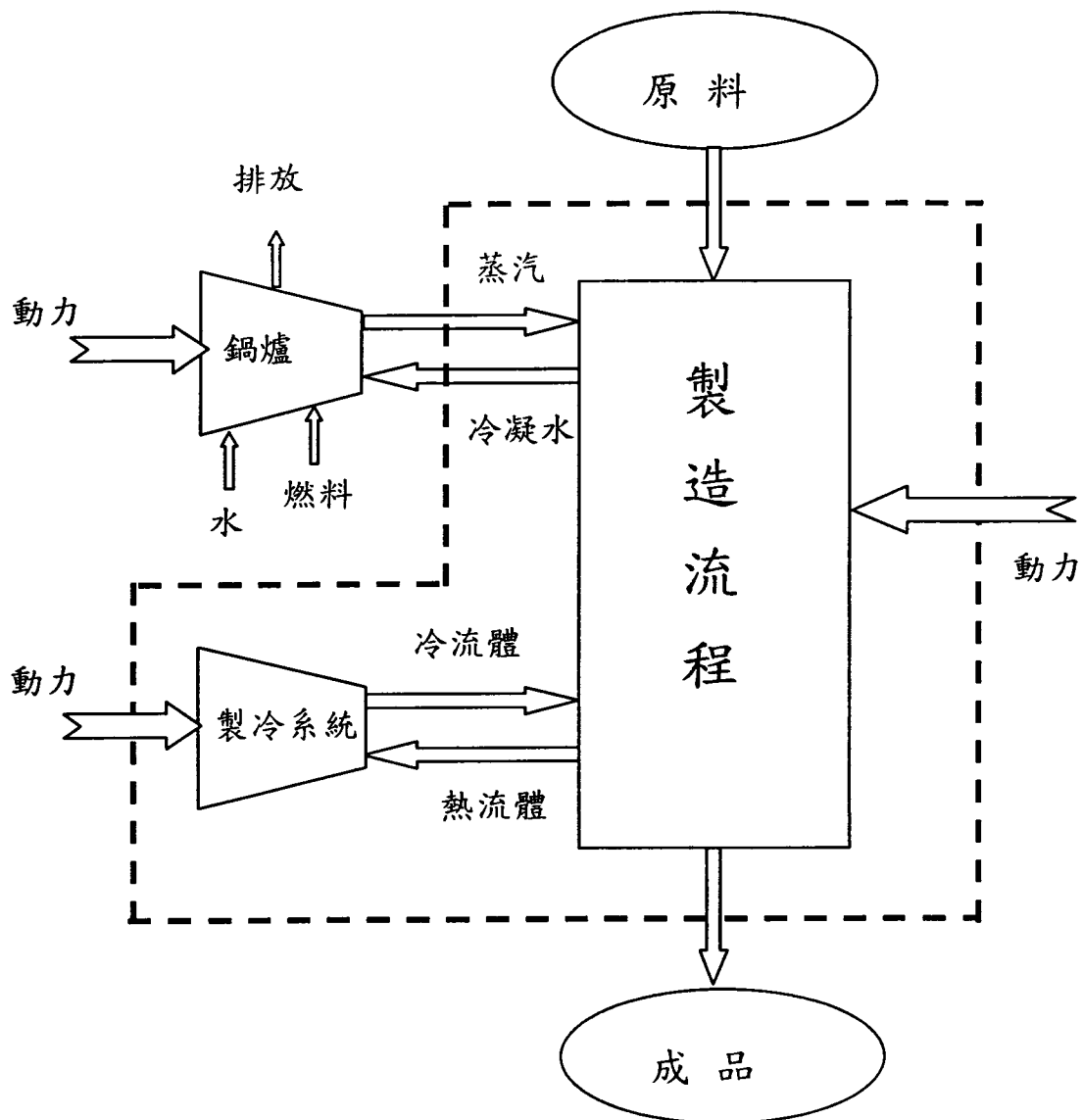
食品工業是一個高能量耗費的產業，在美國食品工業直接消耗的能源佔全國消耗能量的 12-20% (Stout et al., 1982)。80 年代以後也有學者開使用有效能的分析來探討其能量的運用效率。瑞典學者 Tragardh(1981)開始以有效能分析該國乳清粉、加工澱粉與輕鬆蛋糕的製造程序。Rotstein(1983)利用 Sigh et. al.(1980)蕃茄糊加工製程能源使用調查的實測數據，進行蕃茄糊製造過程的有效能收支分析。隨後 Forciniti et al.(1985)提出適當的利用高溫流體加熱進料，可以降低不可逆能的產生，提高能源效率。Fang

et al.,(1983)多目標最佳化技術，探討奶粉製程中蒸發器面積與有效能產生間的最佳關係。Fan et al. (1983) 將結果整理發表，指出以整體系統分析，以代替以往只用熱力學第一定律分析各類單一元件，有效能分析可以更有效率的利用能源。

二、 方法

(一) 系統的界定

本研究使用上一年度總體計畫能源使用調查結果，分析不同果汁製程單位重量不可逆能的產生量，以提供建立綠色果汁的指標。果汁的種類包括柳橙汁、番石榴汁、楊桃汁與蕃茄汁等四種。以製造程序分為原料果汁、冷藏果汁、無菌包裝果汁與熱充填果



汁四種。以整個製程為系統（如圖一）其中主要包括全部製造流程（含包裝與貯藏）、圖一本研究所界定的果汁生產系統示意圖

製冷系統等子系統。蒸汽產生系統不在討論的系統裡面，僅以蒸汽流與凝結水流進出系統邊界。將蒸汽產生系統摒除有下列幾個原因，在調查資料中因所調查工廠大都採用總廠制，幾個不同產品的生產線共用一套蒸汽產生系統，缺乏比較確定的蒸汽產量之資料；本研究目的主要探討蒸汽的利用，直接以蒸汽流量表示，比以燃料油表示更為明確；蒸汽產生與利用還有很大的探討空間如汽電共生等，這些項目尚未包括在本研究中。

(二) 製造流程子系統

製造流程子系統包括整個製造、包裝與貯藏過程，其系的入口邊界為原料，出口邊界為產品。系統邊界上有蒸汽流流入與冷凝水流出，以及電力的流入提供製造程序種使用電動機的能量，這些電能在應用上是不可逆的，因此全數轉變為不可逆能。

蔬果原汁製造作業流程包括：選別與分級、原料清洗、破碎、榨汁、過濾、磨細、離心、殺菌及冷卻、充填包裝。加熱殺菌後的蔬果原汁經冷卻至室溫，以塑膠桶的大包裝容器裝填，移入冷藏庫凍結，並於 -18°C 冷凍貯藏，貯藏時間平均為120天。酸楊桃汁因其酸度高，可以做常溫貯藏。殺菌溫度除蕃茄汁為 118°C ，柳橙汁為 85°C ，番石榴汁與楊桃汁殺菌溫度隨工廠而異，但多介於 $95-100^{\circ}\text{C}$ 。

冷藏與無菌包裝果汁殺菌前的處理大都相似主要包括：解凍、調配、過濾、脫氣、均質，殺菌及冷卻兩種程序就不相同了。冷藏果汁有柳橙汁與番石榴汁兩種，前者的殺菌溫度介於 $85-98^{\circ}\text{C}$ ，冷藏番石榴汁資料中只有兩家殺菌溫度分別為 95°C 與 105°C 。冷藏果汁殺菌後必須迅速降溫至 $4-7^{\circ}\text{C}$ ，並在該溫度貯藏，但在工廠貯藏時間很短，可以忽略。無菌包裝果汁殺菌溫度與冷藏果汁相似但有些工廠使用 $100-110^{\circ}\text{C}$ 高溫殺菌，以縮短保溫時間。無菌包裝果汁殺菌後冷卻至 $25-30^{\circ}\text{C}$ 包裝，且包裝後不需冷藏。雖然無菌包裝果汁可貯藏9-12個月，不論其在工廠內貯藏或在通路上貯藏，所耗費的能量都有限。

熱充填果汁主要製造程序包括解凍、調配、過濾、脫氣、均質、加熱殺菌、充填包裝、冷卻、檢查、裝箱堆棧。熱充填果汁的殺菌溫度較高，約在 95-110°C 之間，蕃茄汁則高達 118°C，殺菌後冷卻至 35-40°C 裝填，裝填後的包裝可以在常溫系貯藏。

(三) 製冷系統

製冷系統包括三個子系統，分別為冷卻水塔、冰水機與冷藏庫或冷凍庫。這些子系統分別提供果汁製程中不同產品與製程所需的冷卻。原料果汁殺菌後通常以冰水機的冰水冷卻至室溫。除酸楊桃汁與有一工廠用大型無菌包裝貯藏番石榴汁，冷卻後的果汁以 -20°C 的冷凍庫凍結貯藏。冷藏果汁與無菌包裝果汁則以冰水機的冰水或冰滷水分別冷卻至 4-7°C 與室溫。後者大多以約 7°C 的冰水冷卻，前者則採用約 0°C 的滷水冷卻。熱充填果汁，在殺菌之後通常使用約 7°C 的冰水冷卻。冷凍循環的冷卻在本研究中都採用水冷，冷卻水來源為冷卻水塔。

1. 冷卻水塔子系統

冷卻水塔利用蒸發冷卻，將冷凍系統冷凝器所使用的冷卻水冷卻，以便再利用。理想的蒸發冷卻是一個絕熱過程，乾空氣進入冷卻水塔吸濕成為濕空氣，高溫水因蒸發移出蒸發潛熱而降溫。因此系統邊界上有高溫水流入，低溫水流出；乾空氣流入，濕空氣流出；以及補充水的流入。冷卻水塔以風扇吸入乾空氣，並以水泵輸送冷卻水，因而有兩個動力輸入。水泵提供冷卻水塔內冷卻水的噴灑，同時有擔負冷卻水在冷凝器與水塔間的輸送。若以有效能分析冷卻水塔的效率，效率定義為輸出有效能除以輸入有效能，其效率約為 30-40% (Bejan, 1988)。但是這種分析不包括冷卻水塔所使用的動力，事實上冷卻水塔最大的能量為風扇與水泵動力，以目前國內製造的冷卻水塔規格計算，在單位水量為 1 kg/s 時，冷卻風扇消耗 0.5kw 動力，而水泵消耗約 25kw 動力。在能量收支上，空氣與冷卻水所佔的能量進出遠小餘動力輸入，而且濕空氣所帶有有效能因溫度過低，幾乎沒有利用價值。因此在本研究分析上，只考慮產生每單位冷卻效果所需付出的能量，而且這些能量在生產冷卻水之後全部變為不可逆能。從國內廠商規格計算，冷卻水以 37°C 輸入 32°C 輸出，外界空氣為 25°C，75% 相對濕度時，輸入 1kw 能量，可以平均可以產生 65kw (標準差

為 9kw) 的冷卻效果。37°C 是製冷系統規格最常使用的冷凝溫度。

2. 冰水機子系統

冰水機子系統由冷媒壓縮機、水冷式冷凝器、蒸發器等元件所構成。壓縮機使用電力為動力，水冷式冷凝器的冷卻水來至冷卻水塔，蒸發器用以製造冷卻的冰水或滷水。冰水機供給果汁製程中使用的冷卻冰水或冷卻滷水，在蔬果原汁、無菌包裝果汁與熱充填果汁製程中，產品品殺菌後冷卻溫度較高，可以使用冰水冷卻，果汁工場常使用的冷卻冰水溫度約在 5-10°C 之間。所使用冰水的溫度愈低，冷卻時所使用的熱交換器愈小；但是冰水機產生冰水的溫度愈低，其能源效率愈低。冷藏果汁製造時其冷卻溫度必需低到 4-7°C，因此必需使用約 0°C 的冷卻冰水，冰水機作業時冷媒膨脹溫度會有波動，而會產生結冰的狀況。因此在此溫度範圍必需使用加有乙二醇等的溶液為冷卻滷水。

冰水機子系統所使用的動力有三個部分，分別為冷媒壓縮機、冷卻水泵與冰水泵。在本研究中，冰水機子系統與冷卻水塔子系統連結成一個新的子系統，因此在系統的介面上只有冰水的進出，與壓縮機動力、冰水泵動力與冷卻水塔動力（包括冷卻水塔風扇與冷卻水泵）。常見的冰水機組有螺旋式與往復式兩類，依據國內 K 廠商所生產的冰水機規格資料計算，可以得到不同規格所需的動力消耗如圖四、五所示。冰水機的主要能源消耗為壓縮機，冷凍能力愈高時螺旋式壓縮機的動力消耗會低於往復式壓縮機，但是相同公稱製冷能力的冰水機使用往復式壓縮機者售價較低，在果汁加工廠內兩種機型都被採用。冰水機組的能源使用效率常用 EER 表示，其意義為使用一單位電能所能產生的製冷能力。依據廠商規格壓縮機大小、37°C 冷卻水需求量，以及 5°C 時製冷能力，可以計算出該作業條件下的 EER 值，若需要其他不同蒸發溫度或凝結溫度下的 EER 值，可以用不同條件 COP 值比概估。表一為依據 K 廠商資料所計算得到螺旋式冰水機與往復式冰水機在冷媒蒸發溫度分別為 5°C 與 0°C 的 EER 值。

3. 冷藏庫子系統

冷藏庫子系統由冷媒壓縮機、水冷式冷凝器、蒸發器等元件所構成。壓縮機使用電力為動力，水冷式冷凝器的冷卻水來至冷

卻水塔，蒸發器用以冷卻冷藏庫的空氣，進而移除冷藏庫的各種熱負荷。在蔬果原汁的製程中，產品品殺菌後冷卻到室溫後即移入冷藏庫內，在 -18°C 溫度結凍貯藏。所使用貯藏溫度愈低，貯藏後的品質愈高；但是冷凍庫的使用成本愈高。主要原因是其冷藏庫機組的蒸發溫度愈低能源效率愈低；而且低溫冷藏庫的侵入熱因庫內與室溫溫度差大而侵入量增加。

冷藏庫子系統所使用的動力有三個部分，分別為冷媒壓縮機、冷卻水泵與蒸發器風扇。在本研究中，冰水機子系統與冷卻水塔子系統連結成一個新的子系統，因此在系統的介面上只有冷卻空氣的進出，與壓縮機動力、蒸發器風扇動力與冷卻水塔動力（包括冷卻水塔風扇與冷卻水泵）。冷藏庫機組的能源使用效率常用 EER 表示，其意義為使用一單位電能所能產生的製冷能力。依據美國 B 廠商規格半密閉壓縮機、冷凝溫度與冷卻水需求量，以及各種蒸發溫度下的時製冷能力，可以計算出該作業條件下的 EER 值。在冷凝溫度為 37°C 蒸發溫度介於 -10 至 -40°C ，的製冷能力介於 $10-50\text{kW}$ 之間，冷藏庫的 EER 值可以用下列式子表示。

$$EER = (8.27 + 0.17 \cdot T_{ev}) \cdot \dot{Q}^{-0.26} \quad (1)$$

其中 EER 為能量效率比無因次； T_{ev} 為蒸發溫度以 $^{\circ}\text{C}$ 為單位； \dot{Q} 為冷凍能力 20 單位為 kW 。表二為在上述作業條件下蒸發溫度介於 -10 至 -30°C 時的 EER。由表中可以半密閉壓縮機組在 30kW EER 值最佳，這點與一般冷凍庫機組常用 25 或 30kW 單機組合而成相吻合。蔬果原汁使用 -18°C 的貯藏溫度，因此冷凍庫設定在 -20°C 。使用 30kW 的冷凍機組 EER 值為 1.54。

（四）有效能與不可逆能

如圖一的一個完整的果汁製造流程系統其邊界包括產品的進出、蒸汽的進出、製冷動力的輸入以及製程機械動力的輸入。產品與蒸汽質量的進出因而有能量的進出。產品的有效能隨環境溫度而改變，其計算公式的推導過程詳列於 Rotstein(1983)。在沒有相變化時計算公式如下：

$$E_{e_{out}} - E_{e_{in}} = \tilde{c}_p (T_{out} - T_{in}) \left[1 - \frac{T_o}{(T_{out} - T_{in})_{lm}} \right] \quad (2)$$

公式符號定義如下 $E_{e_{out}}, E_{e_{in}}$ 分別表示流出與流入的有效能單位為 kJ/kg ； \tilde{c}_p 為物質的平均比熱單位為 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ； T_{out}, T_{in} 分別表示流出物與流入物的溫度 K 。 T_o 為環境溫度 K ，在本研究中以 25°C 為環境溫度。 $(T_{out} - T_{in})_{lm}$ 為對數平均溫度差單位為 K ，其定義如下：

$$(T_{out} - T_{in})_{lm} = (T_{out} - T_{in}) / \ln(T_{out} / T_{in}) \quad (3)$$

在相變化過程中有效能的變化如下 (Bejan, 1988)：

$$\Delta E_e = \Delta H - T_o \Delta S \quad (4)$$

其中 ΔW_e 、 ΔH 、 ΔS 分別表示相變化過程的有效能差、潛熱差以及熵差，前兩者單位為 kJ/kg ，熵的單位為 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ 。在相變化中若相變化點溫度為 T_p 則，熵變化值如下：

$$\Delta S = \Delta H / T_p \quad (5)$$

在本研究中，蒸汽進入系統時為飽和蒸汽，在相同壓力以飽和冷凝水離開系統，因此其有效能變化只考慮加熱溫度（即凝結溫度）所產生的差異。若果汁在冷卻過程由液態凝結為固態，則其有效能的變化必需分為三段計算：

$$E_{e_{out}} - E_{e_{in}} = \tilde{c}_{p_s} (T_{out} - T_p) \left[1 - \frac{T_o}{(T_{out} - T_p)_{lm}} \right] + (\Delta H_f - T_o \Delta S_f) + c_{p_l} (T_p - T_{in}) \left[1 - \frac{T_o}{(T_p - T_{in})_{lm}} \right]$$

(6)

符號定義同前，足碼 l 、 s 分別代表液相與固相 ΔH_f 、 ΔS_f 分別為凝固時的焓差與熵差。

在本研究中果汁為 12% 清淡果汁其液態平均比熱為 $3.8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ，固態平均比熱為 $1.9 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ，假設凍結溫度為 -1°C ，其熔解潛熱為 333.1 kJ/kg 。(Geankoplis, 1993)