廚餘堆肥控制策略之探討

林子傑[1]，周楚洋[2]

1. 國立台灣大學生物產業機電工程學系博士候選人
2. 國立台灣大學生物產業機電工程學系副教授，本文通訊作者

摘　　要

本研究旨在探討不同控制策略對廚餘堆肥化過程的影響，藉由實驗取樣及分析的結果，作爲此影響的判斷依據。本研究總共進行五個批次的實驗，每批次的醱酵原物料都是依菌種與自製廚餘 1:15 (w/w)的比例添加。第一批次爲自然醱酵狀態，只外加風量控制並每日攪拌一次。第二批次則先擠壓去除廚餘物料的水分，其餘各項操作條件皆同第一批次。第三批次以加熱及攪拌使溫度維持在 50±1℃的狀態，並持續三天，其餘條件則同前二批。第四批次使溫度維持在 50±1 ℃一天，之後則恢復爲送風及攪拌每日各一次。第五批次除了持續維持溫度在 60±1 ℃ 的狀況下，並保持含水率在 50%下進行醱酵。以上五個批次都採間續送風的方式，每半小時送風 20 min，風量爲 43 L/min。實驗結果顯示加熱的操作對脂肪的去除有正面的助益，去除的效率以第四批次最好，7 天內由 4.96%減少到 3.02%。C/N比的下降速度則以第五批次最佳，7 天內從 50.4 下降至 38.5。各批次 pH 值都爲先降後昇，灰分則爲持續增加，粗纖維去除效果則不明顯。CO_2 濃度變化，在有加熱的狀況下，往往第一小時皆會超過 50,000 ppm，脂肪的去除則是在第二個峰值出現時進行分解。

關鍵詞：廚餘、堆肥、控制

INVESTIGATION OF CONTROL STRATEGIES FOR THE COMPOSTING OF HOUSEHOLD FOOD WASTES

Tzu-Chieh Lin[1], Chu-Yang Chou[2]

1. *Ph. D. Candidate, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University.*
2. *Associate Professor, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University,Corresponding Author.*

ABSTRACT

This research aims to study the effect of different control strategies on the process of household food wastes composting. In order to meet the special control requirement, a fermentor with agitating mechanism and control capability of temperature, aeration and moisture content, was designed and fabricated for experiments. Five batches of experiments were conducted in this research. The

feed was prepared by adding the seed to the self-cooked food with a ratio of 1:15 (w/w) in each batch. The first batch was aerated composting with agitation only once a day. In the second batch, the water of feed was removed with pressure at the beginning, and other conditions were controlled same as the first batch. The third batch was heated constantly to maintain a temperature of 50±1 °C for three days, and stirred when the temperature is lower than the designated temperature, while other conditions were kept the same as the first batch. In the fourth batch, the fermentor was heated to maintain a temperature of 50±1 °C during the first day, and other conditions were controlled same as the first batch. In the fifth batch , temperature of the fermentor was maintained at 60±1 °C, and an automatic water spray system was added to maintain the composting material at a moisture content of 50%. Intermittent aeration was adopted for all five -batches experiments. The fermentor was aerated 20 min for every half an hour with an air flow of 43 L/min. It was found that heating is beneficial to the removal of lipid. In operation of the fourth batch, the lipid content decreased from 12.6% to 4.6% in seven days. The fastest C/N decrease, down from 50.4 to 38.5 in seven days, was occurred in the fifth batch. The pH of all five batches behaved the same trend, dropped at beginning and then gradually rose. Ash content of all five batches was gradually increasing. None of the five batches showed remarkable removal efficiency of crude fiber. When heated, the CO_2 concentration was climbed over 50,000 ppm in the first hour. The lipid degradation was occurred at the time when the second peak of CO_2 curve appeared.

Keywords: Household food wastes, Composting, Control

一、前　言

台灣的廚餘廢棄物約佔一般家戶垃圾量的二至三成，以往的處理方式是連同家戶垃圾一起丟棄至焚化廠或掩埋場，但一則因爲廚餘廢棄物中的水易在垃圾車運送過程中漏出而污染市容，再則廚餘廢棄物熱含量低，需額外添加輔助燃料，所以焚化的成本很高，故不宜採用焚化法；若以掩埋方法處理，廚餘醱酵過程中所發出的惡臭及滲出水，會造成二次公害，所以也不適合衛生掩埋法。此外由於各地掩埋場紛紛達到其使用年限，新場址又尋覓不易，因此利用堆肥法處理廚餘廢棄物轉換爲肥料，再回歸於大地的永續循環利用更顯重要。

亞洲國家中，以韓國政府對有機廢棄物回收、堆肥化處理，表現出最積極的態度。韓國和台灣在有機廢棄物的政策演進較接近，韓國的食物、庭園廢棄物約佔家戶垃圾的33%（行政院環保署，2000），過去這些廢棄物主要是採用掩埋處理，過多的垃圾量造成掩埋場不小的壓力。隨著1994年『垃圾費隨袋徵收』的政策強制推動，增加了大眾對資源回收及垃圾減量的意願，並配合廚餘廢棄物的回收，家戶普遍主動不再棄置廚餘(Shin et al., 1997)。進而一步一步限制廚餘丟棄，並自2005年起，掩埋場不再接受食物等有機廢棄物（張，2001）。近來，台灣政府也師法韓國政策開始宣導廚餘回收，將生廚餘材料拿來堆肥，以期能減少台灣家庭廢棄物量，延長所屬垃圾掩埋場之使用期限，並已有了初步的成效。九十二年時，廚餘回收量約167,000公噸，其中83.45%用於養豬，13.32%則拿來做堆肥處理，處理量約22,000公噸，較九十一年的3,700公噸及九十年的216公噸明顯地逐年成長（行政院環保署，2004），未來隨著政府強制推動下，廚餘堆肥化處理預期將更大幅增加。

廚餘堆肥對國內而言顯然是未來環保方面的重要政策，其研究也顯得特別重要。Yun et al. (2000)研究韓國的廚餘堆肥場之廚餘原物料性質，結果顯示韓國廚餘含穀類 16%、水果類 14%、蔬菜類 51%、魚肉類 19%，就同爲米食國家且飲食習慣相近的我國而言，此結果可供我們參考。

由於廚餘廢棄物處理相關研究(Romain et al., 2005; Park et al., 2002; Yun et al., 2000)，過去大多爲實際的現場廢棄物探討，但因爲家庭廚餘廢棄物的變動性太大， 不容易有一致性，對其模式的探討相當困難。故本研究之目的，即是要進行系統化的研究，採固定廚餘廢棄物原料配方，再施以不同的控制策略，並利用感測器線上監測及分析廚餘堆肥過程中成份、性質改變的情形，冀能推導出廚餘堆肥可供利用的控制策略。

二、材料與方法

㈠試驗設備

本研究的系統主要包含廚餘醱酵槽主體、資料蒐集器、空氣泵浦、CO_2濃度計、水分計及 T-type 熱偶線等硬體設備，各項設備的系統配置如圖 1 所示。廚餘醱酵槽主體（泰億攪拌機械公司，台北）如圖 2 所示，醱酵槽大小長 400 mm、寬 260 mm，槽體爲一上方下圓的不銹鋼槽，內容量爲 36 L。其上包含一攪拌軸及四根攪拌杓，攪拌方式主要是上下翻堆，轉速爲 30 rpm，槽體的下側方有八個送風孔，風孔與槽體的下圓切面垂直。槽體的兩側下方有加熱管(1.5 kW)，加熱時由控制器輸出一電壓，使加熱器通電加熱。爲增強醱酵槽的保溫效果，槽體外側並包覆一層隔熱棉，以防醱酵熱的散逸。

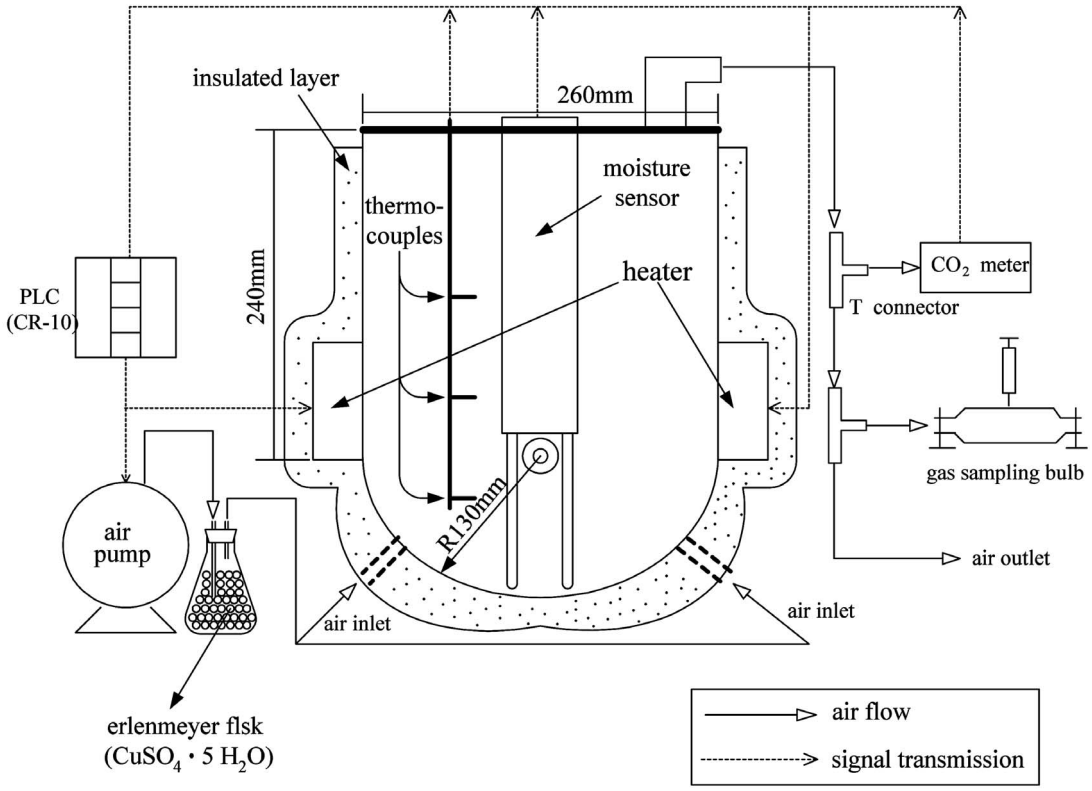

圖 1　廚餘醱酵分析系統配置圖
Fig.1　The schematic diagram of the system layout

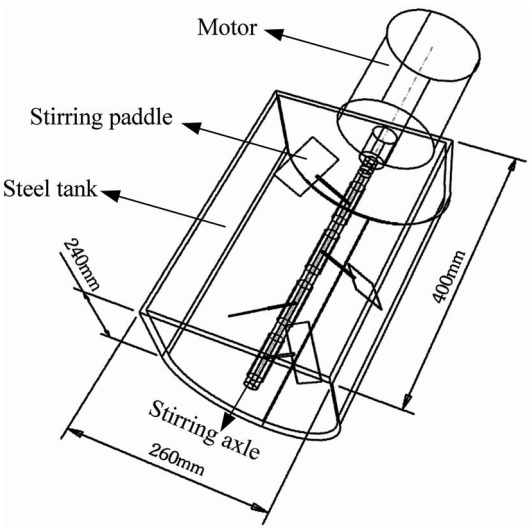

圖 2 廚餘醱酵槽圖

Fig.2 The schematic diagram of the in-vessel composting system

資料蒐集器(CR-10, Campbell Sci., Inc., Utah, USA)專門用於資料的蒐集及簡單的控制之用，其上有一 9 pin 的序列輸入／輸出埠、6 個訊號輸入通道(input channel)、3 個激磁通道(excitation channel)、8 個控制端子(control port)、兩個脈衝輸入(pulse input)及 5V、12 V 輸出各兩個。使用者可以透過鍵盤輸入指令或使用其專用軟體 PC208w 撰寫編輯程式後再傳送至 CR-10。現場量測時只需攜帶 CR-10 即可達成量測資料、記錄及傳送資料（程式）之目的，除量測電壓、脈衝訊號外，另有針對各種不同感測器的指令可供使用。

實驗所用的空氣泵浦爲電磁式空氣泵浦(LP-40A, Yasunaga, Japan)，額定壓力爲 0.12 kgf/cm^2 時風量爲 43 L/min，所需電壓 220V，周波數 50 Hz，輸入功率 39 Watt，出風口徑 13 mm (ID)及 18 mm (OD)。

CO_2 濃度測定計(Guardian plus model 3000, Edinburgh Sensors Ltd., UK)，係利用雙波長的非分散式紅外光(NDIR，non-dispersive infra-red)技術，可用來連續監測 CO_2 濃度，監測範圍爲 0~50,000 ppm。

水分計(Trime-EC, IMKO, Germany)用來量測醱酵過程中堆肥的水分，量測範圍爲 0~95%的容積含水率。

其他設備還包括 3 條 T-type 熱偶線，用來量測槽中堆肥上、中、下三層的溫度變化。SSR 固態繼電器（KD20C40AX，勝特力科技，新竹），搭配 CR-10，用來控制攪拌馬達、空氣泵浦、加熱器等。乾燥設備則用來控制槽中的水分，空氣泵浦送出的空氣先經一含無水硫酸銅的錐形瓶，以去除空氣中的水氣。

(二)試驗材料

1. 菌種

本實驗所採用之菌種，第一批次採用造橋平順豬場的豬糞堆肥混合廚餘預作醱酵後所得之產物爲菌種來源，第二～四批次取前次廚餘堆肥成品爲下批的菌種來源，第五批次爲比較不同菌種的影響，採用畜產試驗所提供的廚餘堆肥爲菌種來源。五個批次的菌種添加量，都是依菌種與原物料 1:15 (w/w)的比例添加。

2. 廚餘原物料

爲避免因廚餘原料性質的差異造成實驗結果判斷上的困難，本實驗採取人工配方且烹煮後之混和食物作爲廚餘的來源。廚餘配方選用依據行政院衛生署食品衛生處所發表國人膳食營養狀況之資料（行政院衛生署，2001），乘上各年齡層人口比例（行政院內政部，2001），得每人每天平均攝取的營養素（總蛋白 69.25g，總脂肪 65.6g、總醣類 260g、總熱量 1907.4 kcal）。並依此比例選用白米、肥豬肉、高麗菜、黃豆等，製備實驗所需的廚餘原料。

所使用廚餘成分及各物料所需比例如表 1 所示。第一批次取比例份量的 10 倍做爲進料，即白米 2,820g、肥豬肉 460g、高麗菜 1,000g、黃豆 1,300g。第二～五批次則取比例份量的 15 倍爲進料，即白米 4,230g、肥豬肉 690g、高麗菜 1,500g 以及黃豆 1,950g。

依廚餘配方配製的原料，經烹煮後所得的各批次總重分別爲，第一批次 11.5 kg、第二批次 15.35 kg、第三批次 14.70 kg、第四批次 14.80 kg、第五批次 15.45 kg。

表 1　廚餘配方
Table 1　Composition and amount used of the feeding material

種　類 Items of feeding stuff	成　分 Composition				[1]每份所需之該物料量 [2]Amount used per serving (g)
	總蛋白 Total protein (g/100g)	總脂肪 Total lipid (g/100g)	總醣類 Total carbohydrate (g/100g)	總熱量 Calories (kcal/100g)	
米 Rice	6.5	0.5	78.1	342.9	282
豬肉（肥） Pork fat	3	89	0	813	46
高麗菜 Cabbage	1.9	0.1	3	20.5	100
黃　豆 Soybean	36.8	18	27.7	420	130
總　和 Totally	69.5	65.9	259.3	1907.5	

[1] 第一批次使用配方物料量的 10 倍為原物料，第二至第五批次則以 15 倍為原物料。
[2] Batch 1 used 10 servings as feeding material, and batch 2～5 used 15 servings as feeding material.

㈢試驗方法

1. 前處理

廚餘物料在烹煮前先細切至 1~2 cm 大小。白米由電鍋煮熟爲米飯，其餘原料用火鍋直接水煮，烹煮後的物料再經篩網濾去大部分的水分，以利之後醱酵作用的進行。

2. 堆肥化實驗之操作

本研究可分爲第一、二批次的長批次實驗，實驗時間超過一個月，以瞭解長時間的堆肥物料變化情形；三、四、五批次爲短批次實驗，在短批次實驗中對廚餘原物料施以不同的控制策略，以探討不同的控制條件下，廚餘堆肥醱酵的變化，每批次實驗時間維持約一週。另爲瞭解堆肥中加熱與水分改變狀況，進行含水率變化實驗，24 小時連續監測堆肥醱酵變化狀況，以做爲後續各短批次控制策略擬定的依據。各批次進行堆肥化實驗的控制條件如表 2 所示。

各批次的操作分別說明如下：

第一批次：進行 30 天，期間每天取上、中、下三層各約 80g 物料進行分析，此批次每天翻堆一次共攪拌 10 分鐘，送風機每半小時開啓 20 分鐘，送風量維持在 43 L/min，其餘控制條件則維持自然醱酵的狀況。

第二批次：共進行 42 天，期間每天取上、中、下三層物料，但每次只取約 50g 物料（因第一批次實驗每次取樣量過多，造成實驗末期樣本量不足，而不易再區分上、中、下三層），並爲了比較起始含水率對堆肥化的影響，因此廚餘原物料在烹煮完後進行擠壓的操作，以降低起始含水率，其餘控制條件則維持同第一批次。

第三批次：共進行 3 天，期間每天取上、中、下三層物料，每次取 50g 物料進行分析。並在實驗期間加熱，維持槽內上、中、下三點溫度皆高於 50℃

表 2 堆肥化實驗操作特性
Table 2 Operational characteristics for each batch

項目 Parameters	批次 Batch					含水率變化實驗 Moisture content test
	長批次 Long-term batch		短批次 Short-term batch			
	Batch 1	Batch 2	Batch 3	Batch 4	Batch 5	
試驗時間 Duration time	30 days	42 days	3 days	8 days	7 days	24 hours
取樣頻率 Sampling frequency	Daily	Daily	Daily	Daily	Twice a day	every hour
加熱時間 Heating time	None	None	3 days	1 day	7 days	1 day
加熱溫度 Heating temperature	None	None	50±1 °C	50±1°C	60±1°C	50±1°C
水分控制 Moisture controlled	None	Extrusion, initial moisture content 55%	None	None	Maintain 50%	None
風量大小 Aeration rate (L/min)	43	43	43	43	43	43
送風時間 Aeration period (min/30 min)	20	20	20	20	20	20
攪拌 Stirring	10 min per day	10 min per day	10 min per day, plus stirring when heater is on	10 min per day, plus stirring when heater is on.	10 min per day, plus stirring when heater is on	Stirring when heater is on

。每天翻堆 1 次共攪拌 10 分鐘，且當加熱器加熱時也進行攪拌，以維持加熱均勻，其餘控制條件維持同第一批次。

第四批次：共進行 8 天，期間第 12 小時取第一個樣本，往後則每天取樣一次，取樣方式如同第二批次。加熱溫度、攪拌方式同第三批次，維持 50±1 ℃，但加熱時間則縮短爲 1 天，之後則不加熱，攪拌時間維持每天 1 次。

第五批次：實驗進行七天，每 12 小時取樣 1 次。實驗中控制廚餘上、中、下三點在 60±1 ℃，並維持水分含量約

在50%（第一天後每小時用水分計偵測1次，不足則補充水分），其餘控制策略同第三批次。

含水率變化實驗：在完成前兩個長批次的實驗後，爲擬定後續的控制策略，因此設計了此項實驗。此試驗所使用之原料種類及重量同前述第二～五批次，即採取比例份量的15倍做進料，試驗只進行1天，並維持堆肥槽內溫度高於50 ℃，但取樣頻率則增爲1小時1次，以明瞭控溫對反應進行的影響及含水率的變化情形，以爲後續短批次進行溫控及維持水分含量在50%的依據。並加測因蒸發所帶走的出水量以了解所需添加的水量。

㈣監測項目及分析方法

爲瞭解堆肥醱酵的狀況，實驗時監測醱酵槽的溫度、CO_2變化及分析堆肥的水分(Moisture content)、灰分(Ash)、pH值、粗纖維(Crude fiber)、粗脂肪(Crude lipid)、總有機碳(Total organic carbon, TOC)、總凱氏氮(Total Kjeldahl nitrogen, TKN)及碳氮比(Carbon to nitrogen ratio, C/N ratio)。其中第一批次的pH值項目，原本是測定包含1:1 (w/w)的樣本與蒸餾水的混合液體，但後來因考慮到其所需樣本量較多及固體不易溶解混合，因此第二～五批次皆改爲1:10 (w/w)的比例。

各項目的分析方法及參考來源如表3所示，並簡述如下：

表3　廚餘堆肥分析項目及方法
Table 3　Analytical methods

項　目 Items	方　法 Methods	參　考　來　源 References
Moisture	Dried at 105°C	中國國家標準，總號5033，類號N6114(行政院經濟部，1984) Chinese National Standard, 5033:N6114 (Ministry of Economic Affairs, 1984)
TOC	Walkley-Black method	Methods of Soil Analysis (ASA and SSSA, 1982)
TKN	Macro-Kjeldahl method	土壤分析手冊(中華土壤肥料學會，1995) Soil Analysis Handbook (CSFS, 1995)
Ash/TVS	Ignited at 550°C，24hr	中國國家標準，總號5034，類號N6115(行政院經濟部，1984) Chinese National Standard, 5034: N6115 (Ministry of Economic Affairs, 1984)
pH (1:10)	pH meter	土壤分析手冊(中華土壤肥料學會，1995) Soil Analysis Handbook (CSFS, 1995)
粗脂肪 Crude lipid	乙醚抽出法 Diethylether abstraction method	中國國家標準，總號5036，類號N6117(行政院經濟部，1984) Chinese National Standard, 5036: N6117 (Ministry of Economic Affairs, 1984)
粗纖維 Crude fiber	Fiber in Animal Feed Ceramic Fiber Filter Method	AOAC Official Methods of Analysis (AOAC, 1980)

水分：將樣品等量混合均勻，取約 8g 置於坩堝秤重後，置於105 °C烘箱(DCM45, CHANNEL, 台北) 乾燥至恆重，所減少之重量百分比即爲水分含量。

灰分：將經乾燥的恆重樣品，置於550 °C高溫烤箱（MF40, CHANNEL, 台北）灰化24小時，所殘留之重量百分比即爲灰分含量。

pH：取3g的樣品及30 mL的蒸餾水以玻棒充分混勻，並斷續攪拌40~50分鐘，再靜置10~20分鐘，浸入電極並輕搖電極，直至 pH 計(Model 720, Orion, U.S.A.) 穩定並讀取其值。

粗脂肪：精秤約10g 的樣品加入圓筒濾紙 a 中，其上輕塞脫脂棉，置入105℃烤箱中乾燥2~3小時後取出置於乾燥箱冷卻至室溫。將適量乙醚加入裝有沸石的脂肪瓶b中，並將a、b置入粟式脂肪抽出器中，持續萃取8小時以上，所得脂肪瓶中增加的油脂，即爲樣品的粗脂肪含量百分比。

粗纖維：取600 mL的燒杯，加入2 g的樣品（先經乙醚處理過）、1.5~2.0g的陶瓷纖維及200 mL沸騰的1.25% H_2SO_4，並置於加熱板上（溫度調整在使25℃ 的蒸餾水在15分鐘左右可至沸騰的溫度），加熱30分鐘。然後用抽氣設備移除所有的水分，並加入50~75 mL沸水反覆沖洗三次；然後加入200 mL 沸騰的1.25% NaOH 加熱30分鐘，並同前用沸水反覆沖洗三次。再用 25 mL 1.25% H_2SO_4沖洗一次及50 mL沸水沖洗三次，最後以25 mL的酒精洗淨，排除所有水分。將殘渣吹入ashing dish中，並置於103℃的烤箱中乾燥2小時（得重 A），然後置於600℃ 的高溫烤箱中加熱30分鐘（得重B）。(A-B)-blank 陶瓷纖維減重）／樣品重×100%，所得即爲樣品的粗纖維含量百分比。

TKN：精秤0.3g的樣品，加入1.1 g的混合催化劑（硫酸鉀：硫酸銅爲10：1）及10 mL 的濃硫酸，置於分解裝置(1007 Digester, Tecator, Sweden)上，加熱8小時以上（加熱至溶液澄清），然後稀釋溶液成60 mL並取其中30 mL及硼酸吸收劑進行蒸餾(1002 Distilling Unit, Tecator, Sweden)，所得硼酸吸收劑用0.01N 的 HCl 進行反滴定，經計算得樣品中TKN含量百分比。

TOC：精秤0.1g的樣品，置於500 mL的錐形瓶中，加入10 mL的1N $K_2Cr_2O_7$溶液並搖勻，然後加入20 mL的H_2SO_4，立即劇烈搖動約1分鐘，隨後靜置30分鐘。加入150 mL 蒸餾水、10 mL 85%H_3PO_4、0.2 g NaF 及30滴的二苯胺指示劑，置入攪拌子，並以0.5N的亞鐵溶液滴定至終點，經計算得樣品中TOC含量百分比。

C/N ratio：以總有機碳對總凱氏氮的比值(TOC/TKN)爲C/N ratio。

三、結果與討論

㈠人工廚餘原物料性質

由表1中的廚餘配方，經水煮後所得的堆肥原料性質分析，如表4所示。本研究人工廚餘原料分析結果和韓國 1999 年的一項廚餘性質研究(Shin and Han, 1999)情形大致相近。但仍有少部分相異之處，如本研究的廚餘配方中，可能是米飯部分的取量較多，故有機碳的含量偏高，而TKN值又較低，導致本研究堆肥原物料的C/N比，較韓國的研究來的高，此結果可能是韓國的廚餘研究中包含動物內臟等氮含量較豐富的部分所致；且本實驗的配方中灰分值較韓國的研究爲低，可能是一般的廚餘廢棄物往往有碎骨頭等含礦物質較多的灰分部分，而本實驗的廚餘配方則無此部分，整體灰分值因此而較低。

㈡含水率變化實驗

由實驗結果發現，含水率在 24 小時內從原來的58%降至49%，含水率變化呈一3次方曲線（圖3），前8小時遞減較速，中間8小時正接近反曲點位置，然後含水率又快速的減少。對照出水量的變化，在第2小時最高，達111 mL，然後慢慢遞減到中間第12小時的20 mL，此後出水量再慢慢增加。但加熱的溫度都是維持一定，理應出水量應大致相同或維持遞減（因含水率越來越少），造成此結果，應該和送風在堆肥內造成的傳遞現象比較有關。一開始因堆肥孔隙度較大，風量帶出容易，因此出水量多，含水率下降快；試驗進行到中段時堆肥孔隙度變小，風量遞送不易，因此無法把蒸發的水氣帶出，等到18小時，

表 4　堆肥原料性質 [1]

Table 4　Characteristics of composting material[1]

Parameters	Batch no. (this study)					Korean study[3]
	1	2	3	4	5	
Moisture content (%)	63.70	58.52	58.45	62.53	62.25	75.6-84.2
Ash (%)	2.42	2.35	2.16	1.93	2.10	6.1-8.5
pH	4.02	5.52	5.33	5.10	5.13	4.0-6.8
Crude fiber (%)	4.73	4.36	4.55	4.27	4.44	2.6-14.3
Crude lipid (%)	8.33	9.66	9.23	11.75	10.10	5.1-15.5
Crude protein (%)[2]	9.81	9.50	8.93	9.56	9.31	17.8-29.4
TOC (%)	53.55	59.57	56.70	58.35	57.35	43.2-53.4
TKN (%)	1.57	1.52	1.43	1.53	1.49	2.0-3.1
C/N	34.11	39.19	39.65	38.14	38.43	13.6-26.7

[1]All data shown above were calculated as dry basis

[2]Crude protein =TKN × 6.25

[3]Shin and Han (1999)

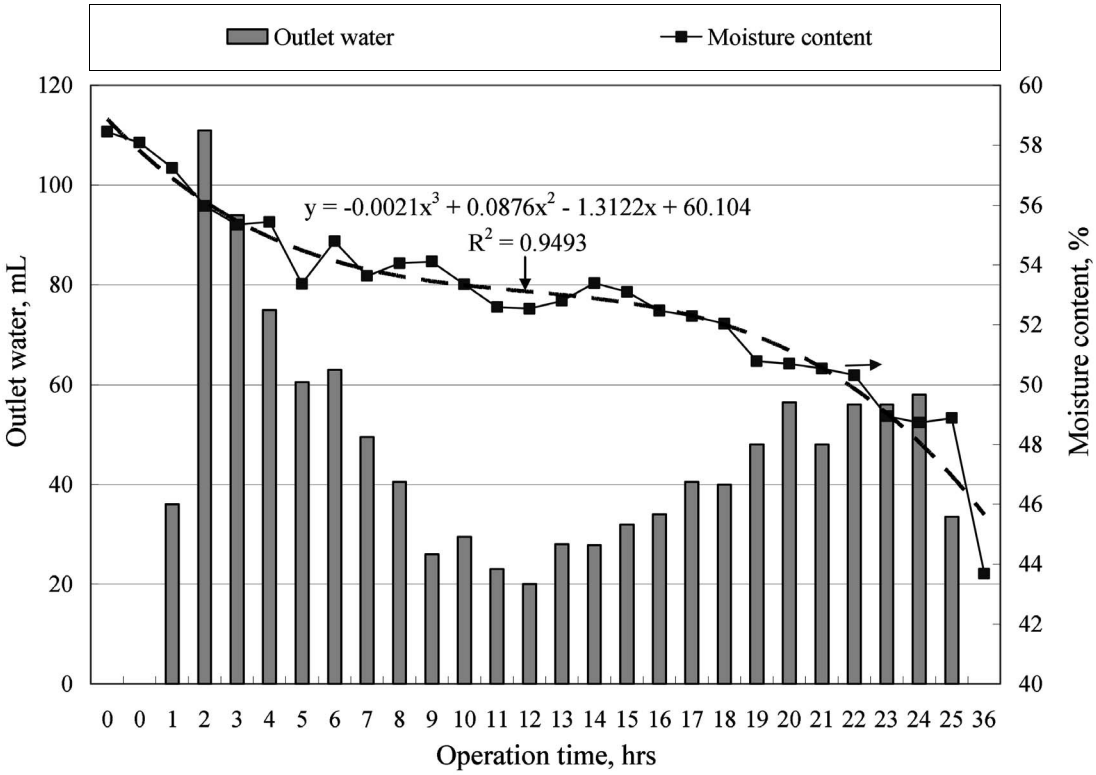

圖 3　含水率變化實驗

Fig.3　Changes of moisture content and outlet water in the heating-moisture content test

因爲含水率已降到52%左右，因此孔隙度又再變大，出水量也大，含水率下降又變快速。24小時後含水率已降至48%，而此時依趨勢來看，含水率下降又特別的快，因此若繼續加熱，往往會使含水率過低而造成醱酵作用的阻礙；否則則需加水回塡，以避免因含水率過低而抑制醱酵的進行。因此第四批次就是在加熱1天後恢復自然醱酵，而第五批次的水分控制是從第 24 小時後開始回塡，且將含水率控制設定在約50%，以比較二者的差異。

㈢廚餘堆肥實驗

堆肥實驗結果如圖4~8所示，分別爲長批次的第一、二批次及短批次的第三、四、五批次。圖中包括含水率(Moisture content)、pH、灰分(Ash)、粗纖維(Crude lipid)、總凱氏氮 (TKN)、總有機碳 (TOC)及碳氮比(C/N ratio)隨時間的變化情形。圖8則爲二氧化碳濃度變化的情形。

1. 含水率

如圖4所示，在自然狀態下（只外加空氣及攪拌）長批次醱酵的第一批次，其含水率呈先升後降的趨勢，由起始時的 63%先緩慢上升至第6天的68%達最高點，然後再逐漸下降，其中，在第23天時水分含量降至約60%左右爲一轉折，之後水分的減少就加劇，急降至第30天的43%。

在第二批次中，一開始對原物料進行擠壓去除水分，以致起始的含水率較第一批次爲低的57%，其後的變化則和第一批次類似。大致的變化爲，含水率從起始的 58%先上昇到第1天的59%，然後再下降到第3天的56%，自此之後即緩步上昇維持在60%左右20多天，等到第30日後，才有明顯的急降，從59%下降到第42日的48%。我們發現其曲線也呈先升後降的趨勢，而含水率曲線大致比第一批次往下挪移了5%的含水率，造成此結果的原因，推測可能是與一開始即擠壓原料而使其起始的含水率比第一批次低了6%有關。

第三、四、五批次則在堆肥過程中加熱。如圖6所示，第三批次共加熱3天，含水率從起始的57%，驟降至第3天的17%，分別爲第1天的49%，第2天的34%及第3天的17%，由於水分含量過低，所以第三批次至第3天已呈堅硬的固體狀態，因此本批次僅操作3天即結束。第四批次則爲加熱一天後恢復不加熱的狀態，結果含水率先由起始的 60%急降至第1天的45%左右，然後維持在40~45%間達5天的時間，之後才又再較大幅的下降至35%。第五批次則在堆肥過程中持續加熱並控制含水率在50%。結果在第1天時，由於含水率都大於50%，所以加水系統並不會啓動，第2~7天時，當含水率低於50%，則加水系統加水，使含水率大致保持在50%上下，如圖6所示。

由第一、二批次中可知，當堆肥系統沒有外加水的情況下，含水率仍然在 65%左右維持了20多天的時間，顯然在堆肥過程中醱酵熱所帶走的水分相較於組織醱酵產生的水量來說，並不特別多，以致於含水率不易下降。而事先對物料進行擠壓的第二批次，雖能使起始含水率下降5%左右，造成廚餘中有較多的孔隙度，讓空氣得以更順利流動，使得堆肥在第2~4天時有一小波的含水率下降，但隨後則因組織醱酵水產生的速度大於蒸散的速度，而又慢慢回升到含水率60%，並維持了20多天。

而在第三批次中，由曲線變化的趨勢，得知含水率下降的速度有越來越大的趨勢，可能因在第1天時，組織醱酵產水量較多，使得雖然有加熱，但含水率下降還沒那麼快速；其後則因含水率過低阻礙了醱酵的進行，使得醱酵產水量沒那麼多，而且水分含量也已沒第1日那麼高，孔隙度較大，空氣易在堆肥中流動，而加速了含水率的下降。

2. pH

如圖4所示，pH 值大致呈現先降後升的趨勢，尤其第一、第二批次，此種趨勢更可明顯看出，而且其變化恰與含水率成相反的態勢。如第一批次的前6天，pH值持續下降，然後維持在pH 4.9左右20天，在24日後才又較明顯的上昇，變化情形恰與含水率變化相反。此種現象，推測是酸在水中解離的影響所造成。

在第二批次中，pH 值在先降後升之後，第 33 天起又有一下降的趨勢，推測應該是難分解的物質開始分解所產生的酸性物質。

圖 6 中第三批次則因實驗時間較短，無法看出pH完整的變化。第四批次爲加熱一天的情形，pH 很快的從 5.2 下降到 4.4 後又上昇回到 4.9 左右，先降後升的反應時間比第一、二批次縮短很多，應該是受到首日水分的快速

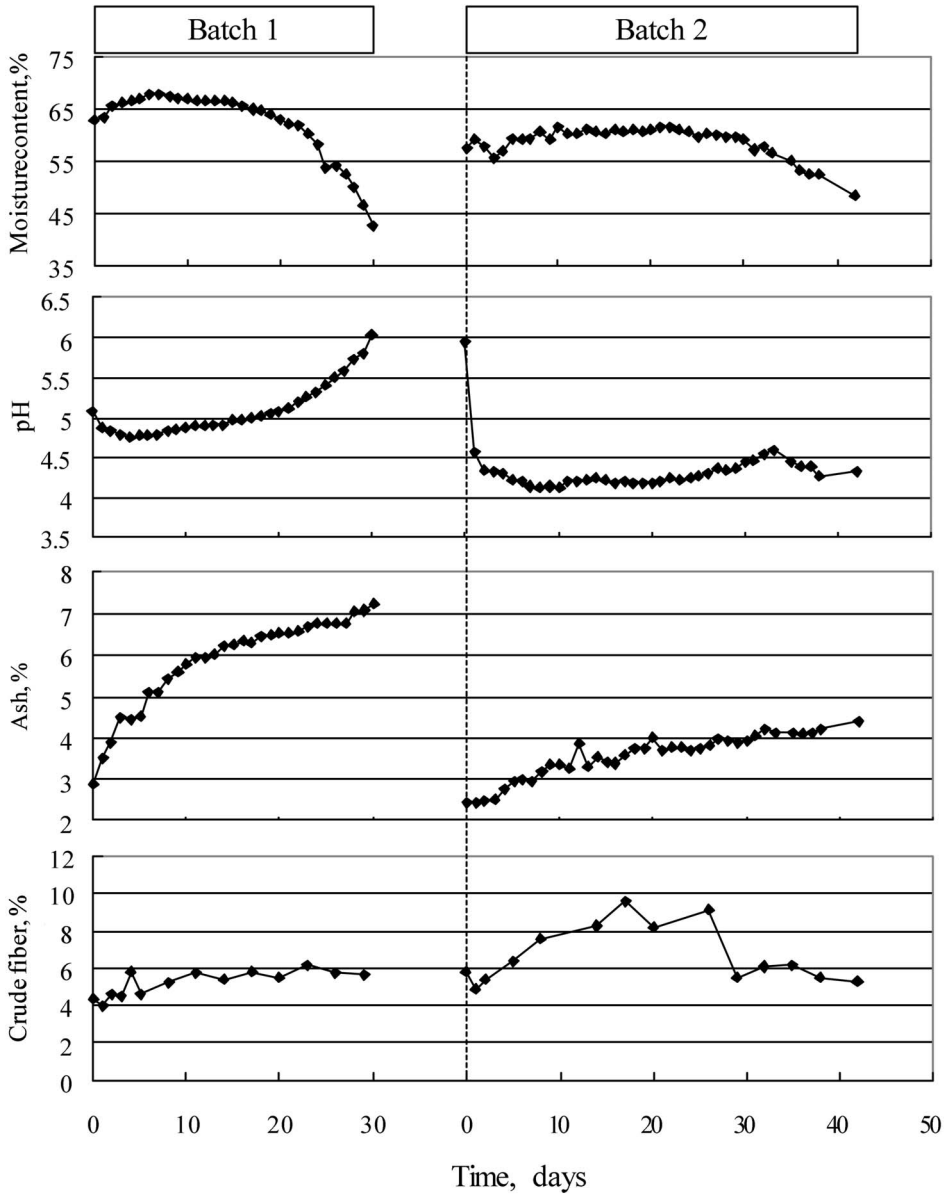

圖 4　批次一、批次二之濕基含水率、pH、灰分（乾基）、粗纖維（乾基）變化情形

Fig.4 The variation of chemical properties (wet-basis moisture content, pH, dry-basis ash and dry-basis crude fiber) for batch 1 and 2

去除的影響。而第五批次，pH 值的上下震盪變化相當大，應是受到外加水分的影響。

所有批次之實驗結果指出，pH 值都介於 3.7 和 6.2 之間，相較於其他不同成份的堆肥來說，算是比較低的，可能是廚餘中含有的脂肪質或其他易分解爲酸性分子的物質較多，造成此低 pH 值的結果。

3. 灰分

如圖 4 及圖 6 所示，灰分在乾基下的含量百分比大致介於 2%～7%之間，其中，第五批次的灰分值顯得特別高，起始灰分值高達 7%左右，比一～四批次的 3%左右高出一倍多，之所以有如此的差異，應該是所添加的菌種來源不同所致。一～四批次添加的菌種爲本實驗所產生的堆肥成品爲菌種來源，而第五批次則採用畜產試驗所的廚餘堆肥成品來植種，其堆肥原物料含有一些小骨頭、樹葉等，可能因此礦物質等灰分物質，比前幾批次自製的堆肥菌種來的高，因此造成整體灰分增加，使得植種後堆肥灰分也較高。

在第一～四批次時，灰分值呈現一遞增的趨勢。表面上看來，堆肥中灰分的含量百分比似乎是增加，但實際上灰分的總量應該是不變的，乾基所得的數值增加，乃因堆肥中的有機質分解，而使剩下的灰分所佔比例增加，在同樣取一克乾物重時，灰分自然顯得比較多。而第五批次的灰分曲線，則異常的呈一下降的趨勢，可能是因加水回填後取樣不夠均勻（取到水樣）所致。

4. 碳氮比

如圖 5、圖 7 所示，碳氮比大致是呈現遞減的狀態，數值介於 10~50 之間。其中第五批次的整體 C/N 值較高，乃是因總氮值較低，以致相除後數值增加了。而由碳氮比可看出，廚餘堆肥化過程似乎可分成難、易分解兩種主要成分，分別是前 10 天和 20 天後分解。一般來說 C/N 值需降至 20 以下才代表比較安定，則實驗時的醱酵過程，約需一個月的時間才能達到此狀況。在控制含水率的第五批次中，碳氮比下降的速率是最快的，從起始的 50 降至第 7 天的 39，尤其是前一、二天，下降的速率最爲顯著。

5. 粗脂肪

廚餘醱酵過程中，粗脂肪的變化情形如圖 5、圖 7 所示，其中第一、第二批次，大致從堆肥起始的脂肪含量 10%（乾基）左右，開始累積增加至 30 天後的 30%左右。而在有加熱的第三～五批次，脂肪含量才有比較明顯的減少。可能是因加熱後，使油脂被逼出物料外，因而增加與空氣接觸的面積而加速氧化的時間。其中以第四批次加熱一天後停止，脂肪去除的狀況最明顯。從起始的 12%迅速的減少到至第 2、第 3 天的 2~3%，並在第 3 天就發出濃濃的酸味（應是油脂分解爲脂肪酸的結果），之後到了第 6 天時，酸惡臭消失而代之以淡淡的芳香味，推測是脂肪酸被氧化成酯類所發出的氣味。

6. 粗纖維

粗纖維（乾基）的分析結果，如圖 4、圖 6 所示，第一批次爲遞增，第二、第五批次則沒有明顯變動，只有第四批次才比較明顯下降。其中第二批次在 15~29 天之間其含量百分比曲線有較大的震盪（相同的情形出現在第二批次的 TKN 變化），可能是這段期間粗纖維尚未大量分解，且攪拌不夠均勻而影響到數值上相差很多。

圖 4 中，第二批次粗纖維在約 30 天後才比較明顯下降，說明了廚餘中的難分解物質如纖維質等，往往需歷經一個月甚至數月才能分解。而此分解所產生的一些有機酸性物質，造成批次二的 pH 值在 33 天後又開始下降。

7. CO_2 濃度變化

因進行第一批次試驗時 CO_2 濃度計尚未裝設，所以圖 8 所示爲第二至第五批次的 CO_2 濃度變化情形。

各批次的 CO_2 濃度變化，由於在第 1 日時，碳水化合物等易分解的物質大量分解，使得 CO_2 濃度突然急昇，最大時甚至超過本實驗所使用 CO_2 濃度計的最大適用範圍 50,000 ppm，尤以有加熱的三、四、五批次最明顯。

而分解的過程，以第二批次爲例（如圖 8），大致有兩個部分，分別是前 10 天（第 1

天的突起波峰及第 2、8 日處的兩個小波動）和 23 天（第 28 日處的小波峰）後，分別代表易、難分解物質的分解階段，所得結果與王(1996)的蔬菜廢棄物堆肥處理的狀況類似。此 CO_2 濃度在第 2、8 及 28 日具有最明顯的峰值，分別與圖 5 中碳氮比的 1~3 日，8~17 日，29~42 日的急降相當吻合，顯示 CO_2 濃度變化和C/N值改變的情形是大致相符的，且 CO_2 濃

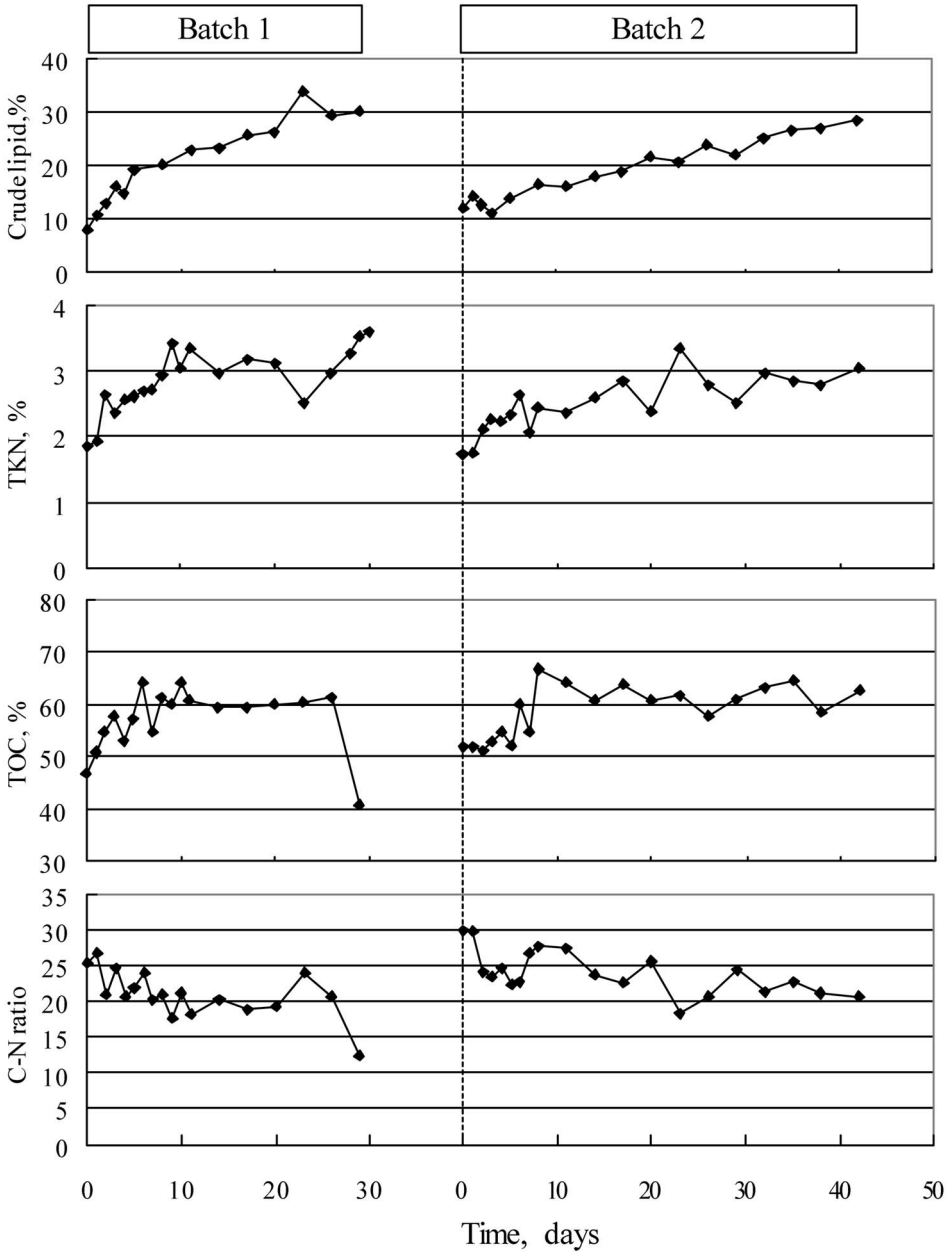

圖 5　批次一、批次二之粗脂肪、TKN、TOC、C-N 比變化情形（乾基）

Fig.5 The variation of chemical properties in dry basis (crude lipid, TKN, TOC and C-N ratio) for batch 1 and 2

度還有許多更佳的優點，即反應較即時，可線上(online)監測。再對照第一批次的 1~9 日及 23 日後的急降，兩批次都說明了易分解的物質在前十日就大致分解完畢，難分解的物質則要至 25 日左右才會開始分解。

在一、二批次中，兩段醱酵高峰期都間隔了一、二十日，中間有一很長的醱酵延滯期，因此，如能有效縮短兩醱酵旺盛期出現

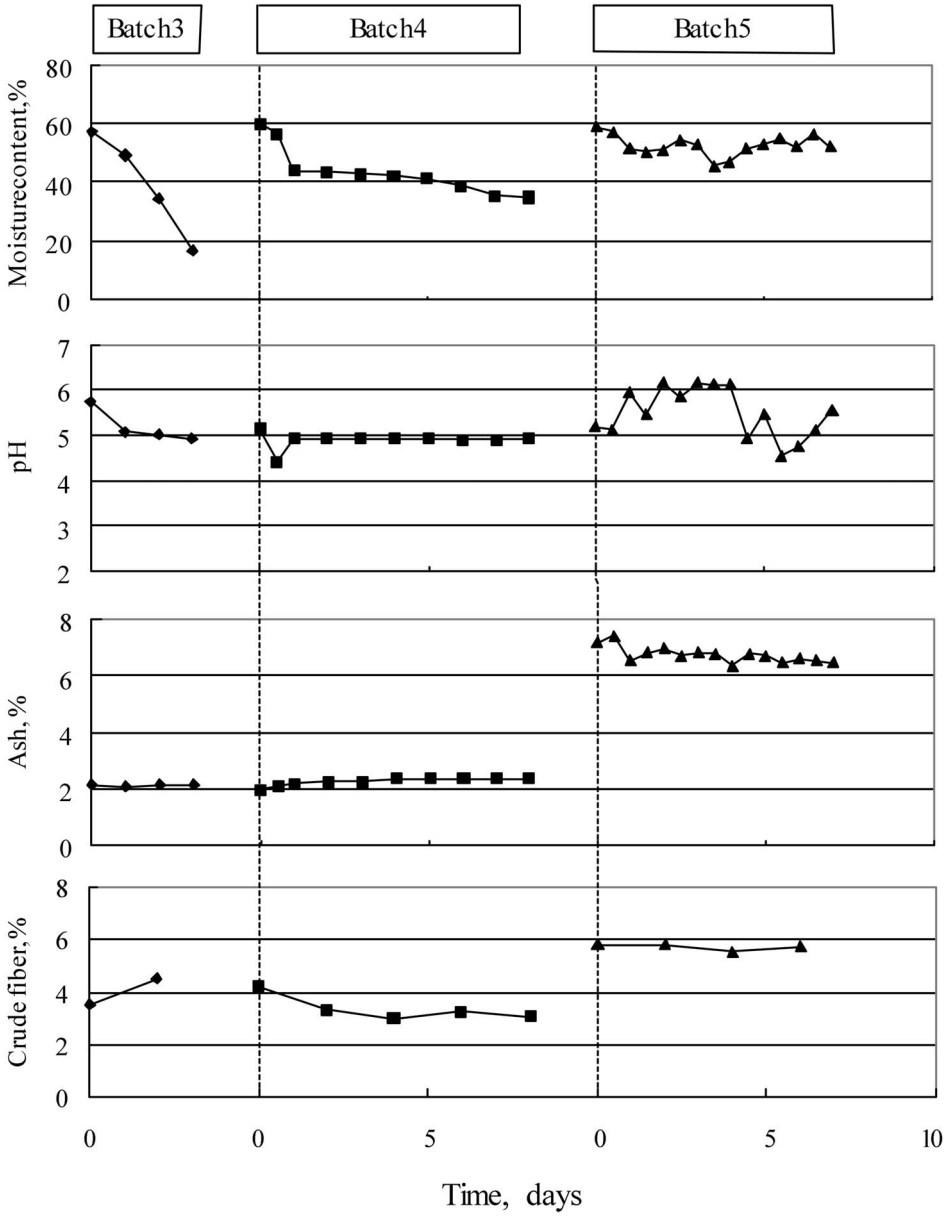

圖 6 批次三、批次四、批次五之濕基含水率、pH、灰分（乾基）、粗纖維（乾基）變化情形

Fig.6 The variation of chemical properties (wet-basis moisture content, pH, dry-basis ash and dry-basis crude fiber) for batch 3, 4 and 5

的時間，則可大大的減少堆肥完熟所需的時間。而造成此醱酵延滯的原因，推測可能是廚餘堆肥化過程的組織醱酵出水，使得堆肥孔隙度被水體阻塞而妨礙了氣體的輸送。

而在同樣有加熱的第四、五批次中，比較有／無控制含水率對堆肥化的影響，結果發現第五批次CO_2濃度的三個峰值（第1、3、5.5天時，如圖8）是幾批次中最早出現的（第

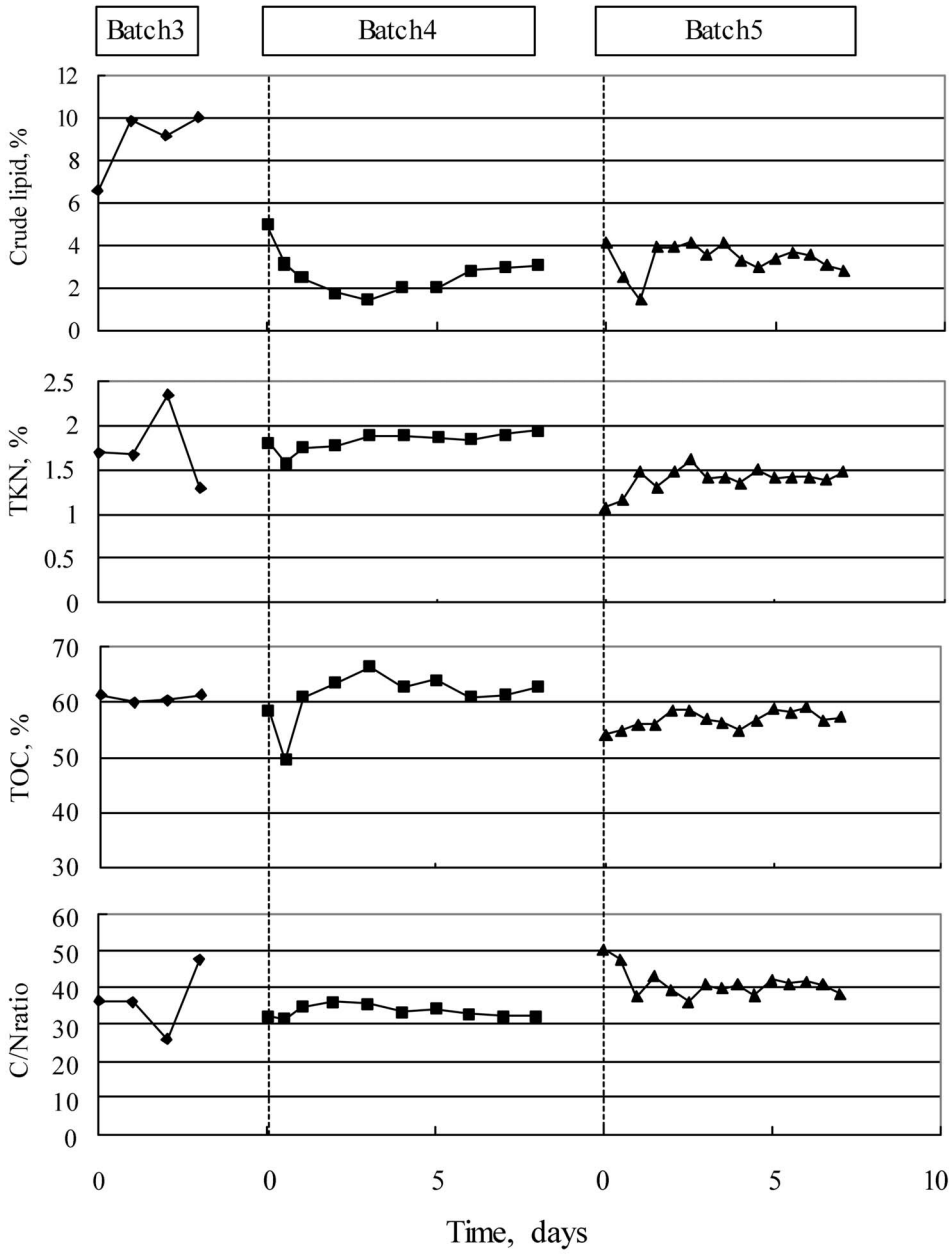

圖7　批次三、批次四、批次五之粗脂肪、TKN、TOC、C-N比變化情形（乾基）

Fig.7 The variation of chemical properties in dry basis (crude lipid, TKN, TOC and C-N ratio) for batch 3, 4 and 5

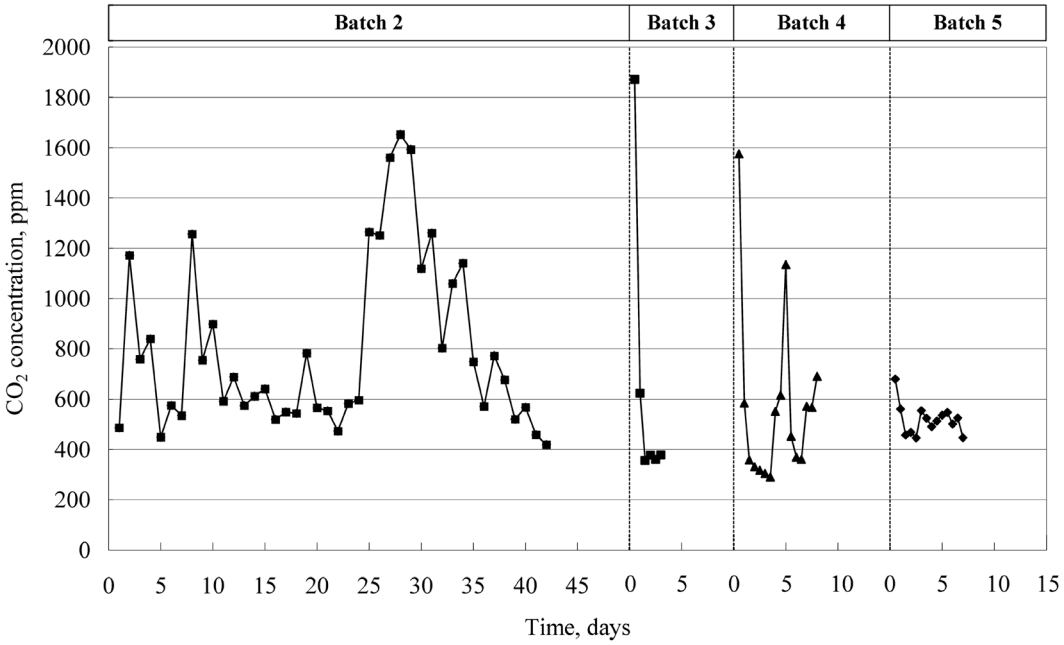

圖 8 二氧化碳濃度變化圖
Fig.8 The variation of CO_2 concentration

四批次三個峰值出現在第 1、5、8 天，第二批次則爲第 1、8、28 天）。如果各個峰值代表廚餘內不同物質分解的時間，則第五批次的操作條件，似乎最不會造成時間上的延遲，可能是因其控制的環境最單純，廚餘中的菌種不會因溫、濕度等的環境變化而需再重新適應、甚至重新長成足量的優勢菌種，因而造成醱酵時間滯延。至於上述中的第二批次，由於觀察的日期較長，所以第 28 天處的波峰，是否可等同第四批次的第 8 天和第五批次的第 5.5 天，則還有待進一步研究。

第四批次在第 3 天可聞到濃濃的酸味（應是油脂分解爲脂肪酸氧化的酸味），之後到了第 6 天時，則是脂肪酸已被氧化成酯類所發出的香氣。再對照第四批次的 CO_2 濃度值，在三天半時 CO_2 濃度開始上昇，到第五天達最高峰的 1,135 ppm，隨後驟降至第六天的 368 ppm，此波段的 CO_2 變化，應該就是脂肪酸氧化所造成的。

四、結　論

本研究探討了幾種廚餘醱酵不同的的控制策略，並藉由分析 CO_2 濃度、溫度、pH、灰分、粗脂肪、粗纖維、TOC、TKN、碳氮比的變化，以了解各項不同控制策略對廚餘醱酵的影響。研究結果得到如下結論：

當加熱溫度保持在 60±1°C，水分含量控制在 50%時，C/N 比下降最爲迅速，可在七天內由 50 下降至 39。當加熱溫度控制在 50±1°C，加熱一天之後不再加熱，粗脂肪量在 5 天內就由 5%（乾基）降到 2%（乾基），去油脂效果最佳，並在第 7 天時有類似酯類的香味。

針對堆肥反應變化的參數，CO_2 濃度變化較能靈敏的反映出堆肥醱酵的情形，碳氮比雖亦能看出變化的情形，但反應不如 CO_2 濃度快速。廚餘堆肥脂肪分解的時間，應是反映在 CO_2 濃度變化的第二個波峰的時候。由 CO_2 濃度的峰值來看，控制廚餘堆肥化過程中的含水率，似乎能較

快速的分解物質而不會因環境的變化造成菌種分解物質的延滯。對於難分解的物質，可能因取樣時物質的疊加性，反而使含量的百分率上昇。廚餘在進行堆肥化時，CO_2 濃度可分爲易分解及難分解物質兩主要波峰區域，前者主要爲醣類、粗脂肪，後者則爲粗纖維物質。

五、誌　謝

本研究進行期間承沈韶儀博士及李允中博士提供寶貴意見，陳尊賢教授在堆肥特性分析上的指導，特此誌謝。

六、參考文獻

1. 中華土壤肥料學會。1995。土壤分析手冊，9-1～9-24；13-1～13-33。第二版。台北：臺灣省政府農林廳。
2. 行政院經濟部。1984。中國國家標準，總號：5033、5034、5036，類　號：N6114、N6115、N6117。經濟部中央標準局。台北：行政院經濟部。
3. 王竣弘。1996。蔬菜廢棄物堆肥化及其經驗模式。碩士論文。台南：國立成功大學環境工程研究所。
4. 行政院內政部。2001。內政統計年報。台北：行政院內政部。
5. 行政院衛生署。2001。台灣地區各性別年齡層每人每天各種營養素攝取狀況。台北：行政院衛生署食品衛生處。網址：http://www.doh.gov.tw/newdoh/90-org/org-3/nutrition/1-1-1.html。上網日期：2001-1。
6. 行政院環保署。2000。中華民國環境保護統計年報。台北：行政院環保署。
7. 行政院環保署。2004。中華民國環境保護統計年報。台北：行政院環保署。
8. 張文英。2001。臺灣家戶有機廢棄物堆肥化處理之政策研究。碩士論文。花蓮：國立東華大學自然資源管理研究所。
9. AOAC. 1980. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 13th edition, ed. William Horwitz. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
10. ASA and SSSA. 1982. Methods of Soil Analysis, Part 2: chemical and microbiological properties. 2nd edition, eds. A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc.
11. Park J. I., Y. S. Yun and J. M. Park. 2002. Long-term operation of slurry bioreactor for decomposition of food wastes. Bioresource Technology 84: 101-104.
12. Romain, A.C., D. Godefroid, M. Kuske and J. Nicolas. 2005. Monitoring the exhaust air of a compost pile as a process variable with an e-nose. Sensors and Actuators B 106: 29-35.
13. Shin, H. S., E. J. Hwang and C. S. Gee. 1997. Food residuals management in Korea. Biocycle. 38(10): 69.
14. Shin, H. S. and S. K. Han. 1999. Anaerobic digestion of food waste. In "proceedings of International Symposium of Bio-recycling/ Composting in Sapporo", v-2-1～v-2-20. Sapporo. International Symposium of Biorecycling / Composting Organizing Committee.
15. Yun, Y. S., J. I. Park, M. S. Suh and J. M. Park. 2000. Treatment of food wastes using slurry-phase decomposition. Bioresource Technology 73: 21-27.

收稿日期：2006 年　1 月17 日
修改日期：2006 年　2 月　7 日
接受日期：2006 年　2 月22 日