

咖啡渣自濕氣化反應轉換能源之可行性研究

梁登凱，國立中央大學環境工程研究所 碩士
江康鈺，國立中央大學環境工程研究所 教授

一、前言

咖啡是全球期貨貿易額度第二高的國際交易商品，也是許多國家的重要出口經濟作物，估計全球每年約可製造 1,000 多萬公噸的咖啡(International Coffee Organization, 2020)。廢棄咖啡渣為飲料工業之副產品，具有高含水率與腐敗之特性，過去通常將其掩埋或是製成堆肥，然若未能有效再利用或處理處置，極易衍生環境污染或異味等問題。此外，咖啡渣之高含碳量使其具高熱值之特性，然較高含水率之特性於應用熱處理技術時，高耗能成為技術應用之限制。

氣化反應(gasification)係利用高溫，及控制適當比例的氧氣及水蒸氣，將含碳的有機物經過部分氧化反應、水氣反應、水氣轉換反應以及甲烷化反應，產生含一氧化碳、氫氣及甲烷等可燃氣體(Combustible gas)。合成氣依據熱值之不同，可以用於熱能製造、機械應用或是產生電力，作為供應熱量、發電、運輸燃料、可再生能源及燃料等應用，此外，高純度的合成氣，亦可進一步加工成液體燃料或化學品(Zhang et al., 2010)。利用原材料水分之氣化，成為近年研究之重點，文獻提到與蒸氣氣化相比，自濕氣化(self-moisture gasification)的水份在高溫下自發擴散，產氣量可從 $0.852 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 增加到 $0.975 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ，產氣低位發熱量亦可從蒸氣氣化的 11.77 MJ/Nm^3 提升至 12.64 MJ/Nm^3 (Zeng et al., 2017)。

氣化爐作為傳統氣化技術之核心，依據原料與載氣接觸方式而分，其中以固定床及流體化床最為常見。相對於其他形式之氣化系統，流體化床具有停留時間較長、溫度分布均勻、燃料使用彈性大、氣固混合良好等優點，為近年廣泛應用之反應系統(Karatas et al., 2018)。

綜合以上所述，本研究利用模場規模流體化床氣化爐，於設定化學計量比(Equilibrium ratio, ER)為 0.3，以及氣化溫度 800°C 的條件下，探討以不同含水率(Moisture content)之濕咖啡渣，應用空氣氣化處理技術，將其轉換為能源之可行性評估。

二、研究方法

2.1 實驗材料

本研究使用之材料，係採自於中壢某知名飲料製造工廠，採集生咖啡豆經過沖泡加工後，堆置於儲槽內之剩餘咖啡渣。採集之新鮮咖啡渣約 135 公斤，經秤重後密封保存，並馬上置入 7°C 之冷藏庫冷藏，以避免腐敗變質或是發酵等化學或生物的性質變化。新鮮咖啡渣分批於 105°C 之烘箱內烘乾 2-3 天至恆重去除水

分，以利於室溫下之密封保存。

咖啡渣之物化特性分析結果為水分 60.5 wt.%，灰分 0.52 wt.%，揮發分 33.27 wt.%，固定炭 5.71 wt.%。元素分析結果為碳 54.79 wt.%，氫 6.66 wt.%，氧 34.51 wt.%，氮 2.54 wt.%，以及硫 0.183 wt.%。濕基低位發熱量約為 7.46 MJ/kg。

2.2 實驗方法

本實驗主要利用模廠規模流體化床氣化爐，以空氣作為載氣，控制空氣當量比(ER)為 0.3，進氣量約為 83 L/min，以及氣化操作溫度為 800°C之條件下進行實驗。僅調整咖啡渣含水率分別為 0%、40%及 60 wt.%為參數，進料量分別約 1,000g、1,840g 及 3,000g，對濕咖啡渣進行空氣氣化試驗，並使用 GC-TCD/FID 分析產氣氣體組成，計算平均產氣熱值(Lower heating value, LHV)以及冷燃氣效率(Cold gas efficiency, CGE)。

三、結果與討論

圖 3-1 為利用不同含水率(Moisture content, M)濕咖啡渣，以模廠規模流體化床氣化爐氣化之產氣平均組成結果，以主要反應階段(3~15 min)為基礎進行計算平均值。其中隨著含水率從 0 wt.%增加至 60 wt.%，氫氣產量從 9.05 vol.%提升至 13.10 vol.%，而一氧化碳從 12.82 vol.%降至 7.89 vol.%，甲烷則從 6.00 vol.%提升至 7.80 vol.%，二碳氣體從 6.68 vol.%增加至 8.74 vol.%，二氧化碳則從乾咖啡渣的 17.4 vol.%提升至含水率為約 40%的 22.49 vol.%，以及含水率為 60%的 20.36 vol.%。

從平均產氣組成可以看到，提升咖啡渣之含水率可以有效提升氫氣、甲烷、二碳氣體以及二氧化碳的濃度，這是因為水蒸氣的存在作為水氣轉換反應($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$)的反應物，提升氫氣以及二氧化碳濃度，同時一氧化碳被消耗而降低，並且氫氣的存在加強了甲烷化反應(Methanation reaction)($\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$)而提升甲烷濃度。

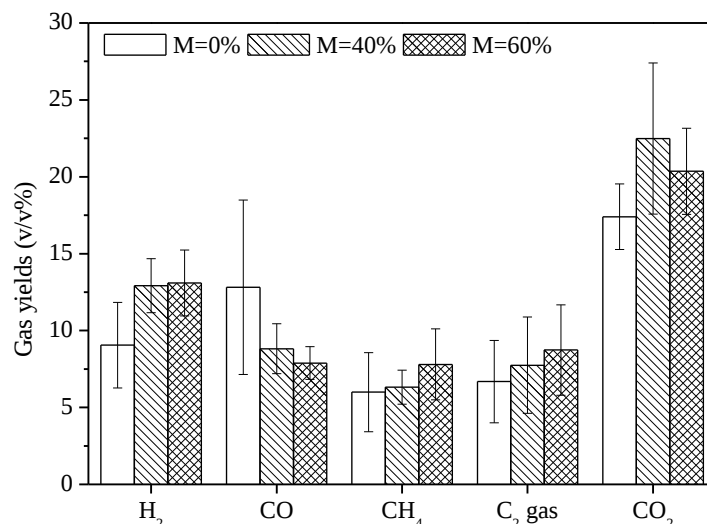


圖 3.1 濕咖啡氣化產氣分布結果

表 3-1 為氣化產能效率分析結果，其中以穩定操作之第二階段(3 分鐘~15 分鐘)之平均計算產氣平均熱值(LHV_{average})，當含水率控制於 0%時之平均產氣熱值約為 5.14 MJ/Nm³，當含水率增加至約 40%時之平均產氣熱值約為 5.23 MJ/Nm³，進一步將含水率增加至 60%時，平均產氣熱值約為 5.72 MJ/Nm³。整體而言，提升咖啡渣含水率能提升平均氫氣、甲烷以及二碳氣體(C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆)之平均濃度，因而有效提升產氣平均熱值。

氣體熱值(LHV)、能量產量(Energy yield)以及冷燃氣效率(CGE)如表 3-1 中所示，以乾咖啡渣在氣化溫度 800°C條件下，冷燃氣效率為 52.7%，當含水率增加至約 40%及 60%時，冷燃氣效率分別為 55.55 以及 39.0%，在含水率 60%時，因產氣熱值之提升，冷燃氣效率達到最高。在含水率 60%條件冷燃氣效率的降低可能是因為實際進料量較多，以及產氣量較少之緣故。

表 3-1 濕咖啡渣空氣氣化產能效率結果

Moisture content	LHV _{average} (MJ/Nm ³)	Energy yield (MJ/kg)	CGE (%)	CGE _{average} (%)
0%	5.14	6.73	27.7	52.7
40%	5.23	8.33	34.4	55.5
60%	5.72	6.17	25.5	39.0

$$\text{LHV}_{\text{average}} (\text{MJ/Nm}^3) = (126.36\text{CO} + 107.98\text{H}_2 + 358.18\text{CH}_4 + 56.0025\text{C}_2\text{H}_2 + 59.036\text{C}_2\text{H}_4 + 63.772\text{C}_2\text{H}_6) / 1000 \quad [3\sim 15 \text{ min}]$$

$$\text{Energy yield} = \text{LHV}_{\text{gas}} \times V_{\text{gas}} / W_{\text{feedstock}}$$

$$\text{CGE} = \text{Energy yield} / \text{LHV}_{\text{feedstock}}$$

$$\text{CGE}_{\text{average}} = \text{LHV}_{\text{average}} \times V_{\text{gas}} / \text{LHV}_{\text{feedstock}} / W_{\text{feedstock}} \quad [3\sim 15 \text{ min}]$$

四、結論

以模場規模流體化床氣化系統，控制當量比為 0.3，氣化溫度為 800℃，並改變咖啡渣含水率為 0%、40%、60%之條件下，探討濕咖啡渣空氣氣化之產氣分布、產能效率評估，具體結果說明如以下所示。

1. 濕咖啡渣空氣氣化之平均產氣組成，在含水率為 0%時，氫氣濃度 9.05 vol.%，而一氧化碳濃度為 12.82 vol.%。而若提升含水率為約 40%時，氫氣濃度提升至 12.92 vol.%，而一氧化碳濃度降低至 8.82 vol.%。含水率為 60%之條件下，氫氣濃度為 13.10 vol.%，而一氧化碳濃度為 7.89 vol.%。
2. 平均產氣熱值在含水率為 60%之條件下，獲得最高值為 5.72 MJ/Nm³。能源產量在含水率為約 40%時，獲得最高值為 8.33 MJ/kg，同時具有最高的平均冷燃氣效率為 55.5%。

五、參考文獻

1. International Coffee Organization, Total production by all exporting countries, 2020
2. Karatas, H., Akgun, F. (2018). Experimental results of gasification of walnut shell and pistachio shell in a bubbling fluidized bed gasifier under air and steam atmospheres. *Fuel*, 214, 285-292. doi:10.1016/j.fuel.2017.10.061
3. Zeng, J., Xiao, R., Zhang, H., Chen, X., Zeng, D., Ma, Z. (2017). Syngas production via biomass self-moisture chemical looping gasification. *Biomass and Bioenergy*, 104, 1-7. doi:10.1016/j.biombioe.2017.03.020
4. Zhang, L., Xu, C., Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.038