

雞隻副產物之再利用技術⁽¹⁾

葉瑞涵⁽²⁾ 李孟儒⁽²⁾ 吳鈴彩⁽²⁾ 朱家德⁽³⁾ 涂榮珍⁽²⁾⁽⁴⁾

收件日期：109 年 12 月 30 日；接受日期：111 年 1 月 11 日

摘 要

本報告將雞隻副產物再利用技術分為羽毛及其他副產物二部分進行探討。常用的羽毛再利用技術為水解技術、複合材料技術、熱裂解技術及化學修飾技術。水解技術可分解羽毛蛋白質結構，以供應生物養分或作為其他產品的原料。複合材料技術是將羽毛與其他材料結合，藉此改變材料特性，如物理性狀、隔熱性及纖維特性。熱裂解技術是將羽毛經熱化學轉化為合成氣、生物油和生物炭（羽毛炭），而羽毛炭可應用於污染吸附及電化學材料。化學修飾技術是利用化學物質改變羽毛蛋白的結構或官能基，進而改變吸附性、電化學性或溶解性。羽毛以外副產物的研究方面，高溫高壓處理技術可簡單的處理大量副產物，並應用於飼料原料。酵素水解技術能保留更多營養或機能性物質，因此產品的附加價值及應用性更佳。萃取純化研究方面，膠原蛋白萃取的文獻較豐富，可供研究人員和業者應用。而軟骨素和透明質酸提取、生物油生產和肉類加工等技術，使副產品潛在價值更加多樣化。在未來我們應該妥善應用各種再利用技術，以提升雞隻副產物再利用率並增加產品附加價值，使生態環境和產業永續發展。

關鍵詞：雞、羽毛、副產物、再利用。

緒 言

臺灣每年屠宰雞隻數量達 37,377 萬隻（108 年農業統計年報），過程中產生許多廢棄副產物，如羽毛及內臟。由此可看出，如何以全雞利用的觀點減少廢棄物並增加其利用價值是畜禽產業需要面對之重要議題。因此本報告針對雞隻副產物，彙整了國、內外具有明確製程條件之研究文獻，希望能供國內研究人員或產業先進參考應用。

雞隻副產物包含羽毛、內臟、骨骼、雞頭、雞腳、砂囊、結締組織及雞皮等。由於羽毛容易分離及清潔，且相關設備已經完備，因此有利於進行研究。此外，羽毛在自然環境下難以分解，會對掩埋場空間及使用年限造成負面影響，若以焚燒處理又造成空氣汙染（Tesfaye *et al.*, 2017），因此吸引許多研究人員探討羽毛再利用技術並產出豐富文獻。本文將彙整目前最新的羽毛研究文獻，並依據技術原理分類，以利讀者了解與應用。而其他副產物的研究文獻較為缺乏，不利於達到全雞利用的理想，因此本文將深入探討其他副產物再利用技術，說明其基礎製程架構、重要測定項目及分析結果，期望這些資訊能對國內研究人員及業者有所助益。

羽毛再利用技術

家禽羽毛約占活體重量之 5 – 7%，其蛋白質含量達 84 – 90%，主要由 β -角蛋白組成（90%），為不溶性纖維蛋白質。由於其蛋白質結構通過雙硫鍵、氫鍵和疏水鍵的相互作用產生高度強韌性，因此對許多消化酶具有抗性（如：胃蛋白酶及胰蛋白酶）（Gupta and Ramnani, 2006）。現今禽肉消費量大，再加上羽毛難以分解的特性，可能會造成環境污染（Grazziotin *et al.*, 2006），因此開發出許多再利用技術。目前常見的羽毛再利用技術依其原理可分為 4 類：水解技術、複合材料技術、熱裂解技術及化學修飾技術。

水解技術

利用微生物發酵、酵素、化學或高溫高壓水解等方式將羽毛分解為角蛋白、胜肽、胺基酸或其他水解產物。此

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2691 號。

(2) 行政院農業委員會畜產試驗所加工組。

(3) 行政院農業委員會畜產試驗所遺傳育種組。

(4) 通訊作者，E-mail: jctu@tlri.gov.tw。

技術目的為分解羽毛強韌的蛋白質結構，進而提升對動物、植物或微生物的營養利用率，因此可應用於飼料、肥料及培養基。此外，亦可分離出水解產物進行利用，例如抗氧化肽可作為保健產品原料、水解後純化的角蛋白可作為角蛋白酶生產基質或複合材料之原料。

I. 發酵水解技術

此技術是利用微生物在發酵時產生的酵素來分解羽毛，因此需要探討液態或固態發酵條件對微生物繁殖、角蛋白酶活性及蛋白質分解之影響，最後再評估其應用價值。

在飼料應用方面，Huang *et al.* (2021) 將大豆粕和羽毛粉以 1:1 的比例混合後，於 121°C 下滅菌 30 min。滅菌後冷卻至 45°C 並將混合菌液 (5 種蛋白質分解能力強的菌株 *Bacillus subtilis* var. natto N21、*B. subtilis* Da2、*B. subtilis* Da15、*Bacillus amyloliquefaciens* Da6 及 *B. amyloliquefaciens* Da16) 接種其中，使菌數達 10^6 CFU/g，並加入 50% 無菌水，而後於 37°C 好氧發酵 2 天。好氧發酵完畢後，再接種 *Bacillus coagulans* L12 菌液，使發酵基質菌數達 10^6 CFU/g，並於 28°C 下厭氧發酵 5 天。發酵完畢後以熱風循環乾燥至水分 12% 以下。結果發現，於飼糧添加 2.5 – 5% 發酵大豆粕-羽毛粉可改善肥育豬的採食量和飼料換肉率。雷 (2013) 以角蛋白分解菌 *B. amyloliquefaciens* Da16 及酸化能力佳的 *Saccharomyces cerevisiae* Y10 進行羽毛粉 (羽毛經過粉碎或研磨) 二階段固態發酵，結果亦發現，飼糧添加量 2.5 – 10% 時，肉雞生長性狀表現良好，甚至優於添加魚粉組。由此可知，發酵水解技術可應用於羽毛粉飼料原料加工技術。

肥料應用方面，Gurav and Jadhav (2012)、Sobucki *et al.* (2019) 及 Sun *et al.* (2021) 分別於液態羽毛培養基 (羽毛為唯一碳氮源) 中接種 *Chryseobacterium* sp. RBT、*Bacillus pumilus* JYL 及 *Bacillus* sp. CL18 菌液進行發酵水解，水解後以過濾及離心方式去除雜質並滅菌之，即完成羽毛的發酵水解液。將此應用於香蕉、小麥及葛苣栽培，發現其肥料應用價值良好，對作物栽培發育具有正面效果。

甲烷生產應用方面，Schommer *et al.* (2020) 研究豬糞-羽毛共同發酵生產甲烷的系統，結果發現，羽毛碎片 (羽毛經過切碎) 經過 *B. sp.* CL18 液態發酵處理後，可以提升甲烷產量。Yusuf *et al.* (2019) 亦以相似方法將羽毛與牛糞或屠宰場廢棄物進行共同培養，結果再次證實，羽毛粉經過微生物預處理後可促進降解並增加甲烷產量。羽毛經過微生物發酵處理後，可提升其降解速率並增加可溶性蛋白，而此現象有助於釋出氮源供微生物利用，進而可能提升甲烷產量 (Yusuf *et al.*, 2019; Schommer *et al.*, 2020)。

發酵水解產物方面，Bezus *et al.* (2021) 發現微生物發酵水解產物可能具有抗氧化活性之潛力，其抗氧化活性與發酵分解產生的游離胺和胺基酸有關，因此嘗試將羽毛液態培養基 (羽毛為唯一碳氮源) 以 *Pedobacter* sp. 3.14.7 進行發酵，而後以離心過濾方式排除雜質，結果發現此發酵水解產物具有良好 ABTS (2,20-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline)-6-sulfonic acid) 自由基清除率、NO 清除活性及 Fe^{3+} 還原能力，具有成為抗氧化產品之潛力。

II. 酵素水解

由於此技術直接使用純化的酵素來分解羽毛，因此不需要進行微生物培養，所以操作較為簡潔且穩定。Pfeuti *et al.* (2020) 於羽毛粉中添加 200% 水、0.5% 市售酵素 (Savinase® 16 L, Sigma-Aldrich Inc.) 及 2% 亞硫酸鈉後進行混合，然後於 55°C 下振盪 24 hr 進行酵素水解。水解後以微波爐加熱至 90°C 維持 5 min，使酵素失去活性，最後進行冷凍乾燥並研磨之。結果發現，羽毛粉經過酵素水解之後，明顯改善對肉雞的標準迴腸胺基酸消化率。Jeampakdee *et al.* (2020) 將 0.5 g 羽毛粉、10 mL 的磷酸鹽緩衝液 (濃度 20 mmol, pH 7.2) 及 1 – 5% 的酵素 (alcalase、flavourzyme 及 neutrase, brenntag) 混合後於 150 rpm、50°C 水解 4 hr。水解完畢後以 80 – 90°C 加熱 15 min 以中止酵素活性，最後以離心及過濾方式收集上清液。結果顯示，添加 5% neutrase 所產生的酵素水解產物，表現出較佳 DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) 及 ABTS 自由基清除率，具有成為抗氧化產品之潛力。

III. 化學水解

本技術主要以酸水解、鹼水解或其他化學方式來破壞羽毛角蛋白質的雙硫鍵及肽鍵，進而水解出角蛋白、肽或胺基酸等物質。Veerapandiana *et al.* (2020) 將羽毛粉以 6 N HCl 進行二階段酸水解 (先以 70°C 加熱 24 hr，再以 130°C 加熱 24 hr)，水解完畢後以 5 N NaOH 溶液進行中和。將水解液過濾去除雜質後，進行蒸發濃縮及烘乾，即取得羽毛水解蛋白，並證實此蛋白可應用於微生物培養，可作為培養基原料。在鹼水解方面，Fagbemi *et al.* (2020) 將羽毛粉與鹼性溶液 (1.78% NaOH 和 1.78% NaHSO_3) 混合後於密封鋼製容器中加熱水解 (87°C, 111 min)，水解完畢冷卻後以 2 M HCl 中和之。將水解液透析後 (regenerated cellulose tubes, MWCO 3500 – 500 Da，蒸餾水透析 72 hr，每天換水 3 次) 冷凍乾燥，即產出羽毛水解蛋白。

由於上述方法使用大量高濃度酸性、鹼性溶液，易產生對環境負面影響的疑慮，因此 Khumalo *et al.* (2020) 使用環境友好性較佳的化學物質進行化學水解。將 15 g 羽毛粉浸入混合水解溶液中 (0.2 – 0.4 M NaHSO₃、0.035 – 0.07 M SDS (sodium dodecyl sulphate) 及 1.5 M urea) 進行加熱水解 (50 – 90°C, 2 – 4 hr)。NaHSO₃ 可減少雙硫鍵的形成；SDS 可作為界面活性劑，避免蛋白質堆疊，穩定水解效率；urea 能增加溶解度，避免水解過程中的蛋白質產生摺疊，藉由這些特性進行水解。水解完畢後以離心及過濾的方式去除雜質，而後以纖維素膜透析管在蒸餾水中透析 5 天，最後進行冷凍乾燥，獲得羽毛分解後的角蛋白，具有應用於生物膜、纖維、水凝膠、海綿等材料之潛力。

IV. 高溫高壓水解

將羽毛以高溫高壓下蒸煮 (2.7 – 3.5 kg/cm² 蒸氣蒸煮 30 – 60 min) 可改善羽毛溶解情形 (Davis *et al.*, 1961)。魏等 (2005) 的研究結果亦指出，蒸氣壓力 3.2 – 3.4 kg/cm²、溫度 115°C、蒸煮 60 min 的羽毛粉具有最佳體外蛋白質消化率。利用此技術，可將羽毛水解後進行乾燥粉碎，製作為蛋白質飼料原料 (Papadopoulos, 1985)。在動物性原料成本漸漸增加並供不應求的現在，此技術在國內外皆被大量應用。

除了用作飼料原料之外，Nurdiawati *et al.* (2017) 將羽毛碎片與水混合 (混合比例 1 : 5) 放入高壓反應器 (autoclave reactor, MMJ-500, Japan) 進行高溫高壓水解 (180°C, 30 min)，水解後濾去雜質發現，水解液含有 3.4% 氮及 13.6% 胺基酸，稀釋後可應用於液態肥料。Nurdiawati *et al.* (2019) 亦以相似方法將羽毛與水混合 (混合比例 1 : 3) 後進行高溫高壓水解 (160°C、6.1 kg/cm² 或 180°C、9.2 kg/cm², 30 min)。將羽毛水解液與家禽墊料水解液 (提供鉀和其他微量礦物質) 混合製成肥料，結果發現可促進廣藿香 (*Pogostemon cablin*) 及綠豆 (*Vigna radiata*) 的生長及產量。

複合材料技術

此技術目的並非將羽毛結構破壞，而是利用羽毛 (如：完整羽毛、羽毛纖維或角蛋白) 本身強韌性、隔熱及纖維等特性，與其他材料進行結合，製作出複合材料。目前相關特性研究成果如下：

I. 改善材料物理性狀

Adediran *et al.* (2020) 將羽毛碎片 (1 – 5%)、木屑 (1 – 5%)、紙漿 (75 – 80%) 和水泥 (20%) 進行混合後，以 0.2 kpa 壓力壓置 5 min。結果發現，當羽毛和木屑比例達到 3 : 2 時，斷裂模數 (modulus of ruptures) 和彈性模數 (modulus of elasticity) 表現良好。Dalhat *et al.* (2020) 於瀝青混凝土的材料中添加 0.15% 的羽毛碎片，結果證實可改善瀝青混凝土的抗車轍性 (rutting resistance)、穩定性和對濕氣的敏感性，且瀝青亦能減少羽毛的生物降解，達到相輔相成之效果。Saravanan and Prakash (2018) 將纖維 (羽毛、黃麻和聚丙烯) 混合後以微型梳理機生產出纖維網，纖維網經過 115°C 加熱 24 hr 除去水分後，放入模具中並以不同加熱加壓條件使其成型。結果發現，最佳的纖維混合比例為 12.5% 羽毛、37.5% 黃麻和 50.0% 聚丙烯，而最佳熱壓條件為 185°C、15 Bar 及 3 min，此條件之混合材料抗彎強度 (flexural strength) 表現最佳。由上述文獻可知，羽毛與適宜的複合材料結合後，可能具有改善物理性狀的效果。若能妥善應用羽毛這種可持續性供應的原料，對產業發展及環境保護皆有所助益。

然而並非所有研究成果皆可改善物理性狀。Taghiyari *et al.* (2020) 將脲醛樹脂 (urea-formaldehyde resin) 和矽灰石凝膠 (wollastonite gel, Mehrabadi Manufacturing Company, 劑量為脲醛樹脂 10%) 混合後，以噴霧方式塗在羽毛—木纖維網，並熱壓 (163 kg/cm², 175°C、6 min) 製成木材複合板。然而，木材複合板羽毛含量達到 10% 對物理性狀 (吸水膨脹、內部裂痕、脆性及彈性模數) 產生負面影響。Taghiyari *et al.* (2021) 利用羽毛纖維網和環氧樹脂 (epoxy resin) 製作複合材料亦發現，隨著羽毛含量由環氧樹脂用量的 5% 提升至 15% 時，硬度 (hardness) 和抗彎強度有負面影響。由於羽毛前處理方式、使用量及製程條件可能會影響材料之間的結合性，進而對部分物理性狀造成不良影響，因此這類文獻皆會針對這些項目評估材料品質之影響。

II. 改善材料隔熱性

由於羽毛具有良好隔熱特性，因此可應用於建材等材料，進而達到減少控溫成本的效果。Ouakarrouch *et al.* (2020) 以石膏為主原料，添加羽毛粉碎片 (0 – 5%) 和水 (添加量為材料的 60%) 混合後放入模具，於環境溫度下 24 hr 定型，而後再以 60°C 乾燥 2 天。結果發現，混合材料熱導率 (thermal conductivity) 和熱擴散率 (thermal diffusivity) 分別降低了約 30.2% 和 18%。Babalola *et al.* (2020) 使用木薯澱粉、甘油、羽毛粉及膨潤土 (bentonite) 製作隔熱性混合材料，亦證實添加羽毛可改善隔熱性。

III. 纖維特性

紡織業需要廉價及可持續性的纖維原材，以達到降低生產成本及穩定生產的目標。而利用起絨機及混紡

技術進行羽毛加工，為具有潛力的方式。Kakonke *et al.* (2020) 將羽毛以起絨機 (fluffer) 研磨成纖維，而後以 50 : 50 的比例與棉纖維混合。經由梳理機 (carding machine) 製成單層纖維後，再將多層纖維合併，經由針刺機 (needle-punched machine) 混織後，即制成羽毛－棉纖維的混合織物，此可作為無紡布原料。

熱裂解技術

熱裂解技術是材料的熱化學轉化技術，是指在惰性氣體下將樣品加熱至到高溫時，生物質轉化為合成氣 (syngas)、生物油 (bio-oil) 和生物炭 (biocarbon) 的過程。而生物炭具有應用於耐火材料、潤滑劑、制動器、電池、耐化學材料及吸附劑的潛力。若能將此技術應用於羽毛廢棄物，則有助於穩定產出生物炭資源。

不同文獻使用的熱裂解條件有所差異。Rangaraj *et al.* (2020) 將羽毛碎片於氬氣環境 (argon gas) 中，以每分鐘 5°C 的升溫速率在 600°C 下炭化 2 hr，而後將羽毛炭應用於電池原料。Hastuti *et al.* (2020) 亦探討電池原料之應用，首先將羽毛於 215°C 下熱裂解 15 hr，再於真空環境下加熱至 450°C 維持 1 hr 即完成羽毛炭。Rahmani-Sania *et al.* (2020) 將羽毛放入不銹鋼反應器並通入氮氣 (nitrogen gas, 150 mL/min) 進行第一階段加熱 (215°C, 24 hr)，而後再將溫度提升至 650°C 進行第二階段加熱 2 hr，並將其應用於水中污染物吸附材料。Li *et al.* (2020) 嘗試探討不同溫度 (300 和 600°C) 熱裂解羽毛 30 min 對羽毛炭產量之影響，結果發現，溫度愈高產量愈低，此可能是較高溫度下，羽毛中氫氧被去除所致。此外，X 光繞射分析 (X-ray diffraction analysis) 發現，溫度愈低的樣品具有更多的非晶態 (amorphous)，而溫度較高的樣品則具有更多的石墨 (graphite) 含量，不同熱裂解條件會影響其結構。

化學修飾技術

本技術利用特定化學物質，改變羽毛蛋白的結構或官能基，進而使其吸附性、電化學性、溶解性等特性發生改變，進而提升應用性。

Suna *et al.* (2020) 將 8 g 羽毛碎片浸入於硝酸溶液 (400 mL 水 + 2 mL 硝酸)，密封後以 60°C 加熱 24 hr，而後過濾、清洗並乾燥之。硝酸溶液使部分羽毛蛋白陽離子化，並激活內部某些官能基，進而改善其吸附 Cr (VI) 離子之效果。Chakraborty *et al.* (2020) 將 4 g 羽毛碎片放入 100 mL 的 2% NaOH 溶液中 (內含 4.0 mL 乙二胺 (ethylenediamine))，於室溫下反應 2 hr 再以蒸餾水清洗並乾燥之。NaOH 及乙二胺會對羽毛蛋白的羥基 (hydroxyl group) 及羧基 (carboxyl group) 進行修飾，進而改善金屬離子吸附性。電化學性方面，化學修飾技術亦有明顯貢獻。Rangaraj *et al.* (2020) 將 7 g 羽毛碎片浸入 50 mL 的 0.5 M 醋酸鋅六水合物 (Zinc acetate hexahydrate) 溶液中以 180°C 加熱 12 hr，使形成硫化鋅羽毛蛋白複合物，而後再於氬氣中 600°C 熱裂解 2 hr，製成硫化鋅羽毛炭複合物，應用於鋰電池電極有良好表現。Hastuti *et al.* (2020) 以相似原理亦開發出羽毛炭的電極材料，再次證實此技術可應用於電池材料。化學修飾技術亦可改善羽毛蛋白之溶解性，Yang *et al.* (2013) 將羽毛蛋白與 40% 甲醛及 10% NaHSO₃ 溶液混合攪拌 3 hr，使羽毛蛋白接上 -SO₃Na 基，藉此提升其水溶性，提升應用於複合材料之可行性。

多種技術綜合應用 (或其他技術)

上述的水解技術、複合材料技術、熱裂解技術及化學修飾技術，經過綜合使用可產生更複雜專業的產品。Li *et al.* (2020) 利用熱裂解技術將羽毛粉製成羽毛炭後，再以複合材料技術結合聚乳酸 (poly lactic acid, PLA)，製作出可生物降解的生物基塑料並應用於包裝或填料。Yang *et al.* (2013) 將羽毛粉鹼水解 (40% NaOH 溶液, 95°C 加熱 2 hr) 後進行化學修飾 (40% 甲醛及 10% NaHSO₃ 溶液混合攪拌，使羽毛蛋白連接 -SO₃Na 官能基)，而後與液化玉米秸稈結合成複合材料並作為尿素的塗層材料，此複合塗層尿素肥料具有緩慢釋放氮肥及高保水性的效果。Siriorn and Jatuphorn (2020) 以化學水解技術 (NaHSO₃、SDS 及 urea) 將羽毛碎片水解為角蛋白之後，再結合 PLA、二氧化鈦 (TiO₂) 及黏土 (clay) 等材料，以電紡絲設備 (electrospinning set, comprised of Gamma high voltage power supply and Syringe pump) 製出納米纖維複合材料，以開發有機染料過濾器。Rahmani-Sania *et al.* (2020) 將羽毛以硝酸溶解之蛋殼溶液進行化學修飾，而後經由熱裂解製成羽毛炭，並製成吸附金屬離子的除污材料。Hastuti *et al.* (2020) 及 Rangaraj *et al.* (2020) 分別使用六水醋酸鋅溶液 (Zinc acetate hexahydrate, 0.5 M) 及氫氧化鉀溶液 (KOH, 5 M) 對羽毛碎片進行化學修飾，而後經由熱裂解產生羽毛炭複合材料，可製成鋰電池的負極或陽極材料。上述文獻結合多種技術，創造出高技術價值產品或材料製程，有助於羽毛廢棄物回收利用及增值。

雞隻羽毛以外之副產物再利用技術

本文彙整的研究文獻中，雞隻羽毛以外副產物可應用於製作飼料原料、酵素水解產物、萃取膠原蛋白及其他生醫或食品材料開發。由於此類副產物亦富含蛋白質，可利用高溫高壓處理技術 (即化製) 製作成肉骨粉與脂肪等產

品，並應用於牲畜或寵物飼糧中 (Zier *et al.*, 2004)。由於此技術較簡單且可處理大量副產物，是目前此類副產物常用的處理方式。而在酵素水解產物方面，利用酵素可以進行更溫和、快速且可控制的分解作用，可製作出營養價值更高或是具有機能性的產品，進而提升副產物附加價值 (Kristinsson and Rasco, 2000; Slizyte *et al.*, 2009)。除了以溫度或酵素水解利用之外，此類副產物中富含之膠原蛋白、軟骨素 (chondroitin sulfate)、玻尿酸 (hyaluronic acid) 或其他可利用物質 (如：油脂)，因此許多文獻將其萃取純化並評估其應用價值。以下將對這些應用方式說明其基礎製程架構、重要測定項目及分析結果。

利用雞隻羽毛以外之副產物製作蛋白質飼料原料

I. 製程架構

此類研究方法主要用高溫高壓處理技術製作飼料原料。使用原料種類多而繁雜，包含雞隻羽毛、內臟、頭、腳、砂囊或死禽。原料冷凍保存，製備前解凍。原料解凍後直接進行均質化及加熱滅菌程序。加熱溫度約為 140℃，加熱時間介於 45 – 60 min，壓力 3.5 – 4.0 kg/cm²。加熱滅菌後冷卻至室溫，再以篩網分離出固體及液體。液體可經由離心 (3,000 rpm, 60 min) 分離油脂，而固體經過壓碎及均質化後，以烘乾 (80℃, 6 hr) 或真空乾燥 (4 hr) 方式，排除多餘水分。獲得的乾燥物料在混合機中研磨後進行粒度分析 (2 mm 篩網)，並適當標識以用於後續的質量評估，包含物理化學，微生物學和穩定性分析 (Awachat *et al.*, 2011)。

II. 重要測定項目及應用方向

此類製程之目的為供應動物飼料原料，因此測定項目多以一般成分 (水分、粗灰分、粗蛋白、粗脂肪、粗纖維、無氮抽出物)、鈣磷含量及熱量為主 (Costa *et al.*, 2008; Awachat *et al.*, 2011)，並另外評估胃蛋白酶消化率、黃麴毒素、粒徑及保存期間酸度、pH 值、沙門氏菌、硫代巴比妥酸反應物 (2-thiobarbituric acid reacting substances, TBARS assay) 等保存性試驗 (Costa *et al.*, 2008)。相關文獻分析值如表 1。此外，由於副產物加工時，碳水化合物、脂肪及蛋白質的降解會產生酸味、硫醇 (mercaptans)、胺 (amines)、醛 (aldehydes) 或其他臭味物質 (Cheremisinoff, 1993)，因此 Kruger *et al.* (2009) 將家禽副產物飼料原料製作過程的廢氣進行冷凝收集，而後以頂空固相微萃取 (headspace solid phase microextraction) 抽取氣體樣品，再以氣相層析儀 / 質譜檢測器 (gas chromatograph/mass spectrometric detector, GC/MSD) 分析氣體分子。此研究可用於評估製程的廢氣處理效率或調整製程條件之參考。

表 1. 雞隻羽毛以外之副產物蛋白質原料之成分分析值

Table 1. The compositions of protein materials made from chicken by-product

Composition	Costa <i>et al.</i> (2008)	Awachat <i>et al.</i> (2011)
Types of by-products	Viscera	Head, feet, viscera, liver, gizzard, feathers
Gross energy, kcal/kg	5,098	6,060
Moisture, %	5.53	7.73
Crude protein, %	60.7	60.6
Crude fat, %	27.1	20.3
Crude ash, %	4.34	14.8
Crude fiber, %	0.78	No detection
Carbohydrate, %	1.54	No detection
Calcium, %	0.21	3.01
Phosphorus, %	1.10	1.64
Pepsin digestibility, %	82.4	No detection
Acidity, mg NaOH/g	9.40	No detection
pH	6.32	No detection
TBARS assay, mg MA/kg	1.57	No detection
Aflatoxin, ppb	No detection	0
Salmonella, CFU/g	0	No detection
2 mm sieve retention values, %	0.28	No detection

利用雞隻羽毛以外之副產物製作酵素水解產物

I. 製程架構

此類研究方法主要用於製作雞隻羽毛以外之副產物之酵素水解產物，如頭部、腳、臟器、血液、皮膚、骨骼。樣品前處理方面，血液以離心 (2,500 g, 15 min) 分離出血球及血漿後再進行酵素水解 (Wongngam *et al.* 2020; Nikhita and Sachindra, 2021)；皮膚以冷凍乾燥脫水後，再以丙酮脫脂，最後加水均質成漿液後再進行酵素水解 (Onuh *et al.*, 2014; Onuh *et al.*, 2015)；其他副產物清洗後，加水絞碎或均質，而後加熱消毒 (85 – 100°C, 5 – 20 min)，並於冷卻後進行酵素水解 (Cheng *et al.*, 2008; Taheri *et al.* 2013)。酵素水解時，依使用酵素所需的環境要求調整 pH 值及溫度，而後加入酵素開始水解過程。之後加熱終止酵素反應 (95 – 100°C, 10 – 20 min)，並以離心或過濾方式分離出水解產物 (Taheri *et al.* 2013; Onuh *et al.*, 2015; Nikhita and Sachindra, 2021)。

由於原料來源、酵素種類、酵素基質比例及產品應用目的皆不相同，所以不同文獻記載之酵素處理條件有所差異。雞血球酵素水解方面，Nikhita and Sachindra (2021) 以 2.5% Alcalase、60°C 進行酵素水解，而 Wongngam *et al.* (2020) 則以 4% Alcalase、51.1°C、pH 9.6 為最佳酵素水解條件。雞皮以 3% Alcalase、pH 8.0、55°C 進行酵素水解，或以 1% 胃蛋白酶、pH 2.0、37°C 進行第一階段分解後，再以 1% 胰蛋白酶、pH 7.5、37°C 進行第二階段分解 (Onuh *et al.*, 2014; Onuh *et al.*, 2015)。Taheri *et al.* (2013) 使用鹼性蛋白酶 0.07 U/g，於 52°C 下震盪培養分解家禽頭部及腿部副產物。Cheng *et al.* (2008) 則分別以 Alcalase (pH 8.0, 50°C)、胃蛋白酶 (pH 3.0, 37°C) 或胰蛋白酶 (pH 8.0, 37°C)，在酵素與基質 1:50 的條件下進行白肉雞腿骨的酵素水解，陳 (2011) 亦使用相似的酵素處理條件來開發雞腿骨水解產物。而 Jamdar and Harikumar (2008) 的製程較為特殊，使用未消毒的雞隻內臟 (腸、脾、膽) 及結締組織，以鹽酸調整 pH 值至 2.8 後，在未添加酵素的狀況下以 55°C 攪拌培養，利用本身微生物及酵素進行分解。

II. 重要測定項目及應用方向

開發這些技術需要設定關鍵的測定項目，作為修正製程之參考。常見的測定項目包含酵素活性、可溶性蛋白質含量、胜肽含量及水解度 (degree of hydrolysis, DH)，藉此評估水解時酵素活性是否保持良好、可溶性蛋白質是否順利分解並釋出胜肽 (Cheng *et al.*, 2008; Jamdar and Harikumar, 2008; Taheri *et al.*, 2013)。利用上述方法評估酵素水解效果後，可進一步分析水解產物的一般成分、胺基酸組成及產量，以建立這些製程或產品的基礎資訊。最後，相關文獻依據產品之應用目的進行下列評估：

- (i) 開發細菌培養基：Jamdar and Harikumar (2008) 發現雞隻內臟水解產物的胺基酸組成及含量豐富，具有成為飼料或細菌培養基蛋白質來源之潛力。由於細菌培養基的原料需要在各種 pH 值條件下具有良好的溶解度 (solubility)，故進行水解產物在 pH 1 – 12 的溶解度評估，並證實溶解度皆可達到 93% 以上。Taheri *et al.* (2013) 酵素水解產物之研究結果亦表現出良好溶解度。
- (ii) 食品原料：Balti *et al.* (2010) 指出，魚類及雞隻副產物可能具有成為食品粘合劑、乳化劑或膠凝劑之潛力。此外，Taheri *et al.* (2013) 亦針對魚類 (虹鱒魚內臟) 及家禽 (頭部和腿部) 副產物的水解產物進行溶解度、保水性 (water holding capacity)、吸油量 (oil absorption capacity)、乳化性 (emulsifying properties)、起泡性 (foaming properties) 及色澤等項目之評估，研究結果發現魚副產物之水解產物評估結果較雞隻副產物的為佳。未來仍可參考此文獻方法，找出適宜的雞隻副產物種類，開發食品原料。
- (iii) 機能性食品：由於國內去骨雞腿肉產品漸漸盛行，陳 (2011) 嘗試研究雞腿骨副產物之機能性產品，並發現雞腿骨之酵素水解產物富含 L-精胺酸 (L-Arg)，具有開發為改善勃起功能產品之潛力，故測定雞腿骨酵素水解產物對公鼠交配實驗、睪丸重量、貯精囊重量、精液品質及血液睪固酮含量之影響。結果顯示，公鼠灌食雞腿骨酵素水解產物後交配次數顯著上升，並提升配種成功率。而 Cheng *et al.* (2008) 為了探討雞腿骨副產物應用於機能性產品之潛力，測定雞腿骨酵素水解液之抗氧化能力及血管收縮素轉換酶 (angiotensin I converting enzyme, ACE) 抑制活性，結果發現，使用 Alcalase 酵素水解之 DH 表現較胃蛋白酶和胰蛋白酶佳，且其水解產物表現出更高的 ACE 抑制活性。除了雞骨之外，雞血及雞皮的酵素水解產物亦被發現具有抗氧化及 ACE 抑制活性的效果。進一步以動物試驗證實，餵飼雞血或及雞皮的酵素水解產物，皆可降低自發性高血壓大鼠之收縮壓 (Onuh *et al.*, 2015; Wongngam *et al.*, 2020)。由上述文獻可知，雞隻副產物酵素水解產物具有成為機能性食品之潛力。

利用雞隻羽毛以外之副產物萃取膠原蛋白

I. 製程架構

雞隻副產物萃取膠原蛋白的文獻較多，如雞爪、胸軟骨及雞皮等。雞隻副產物萃取膠原蛋白技術：樣品前

處理及萃取方式之之比較，如表 2。

表 2. 雞隻副產物萃取膠原蛋白技術：樣品前處理及萃取方式之比較

Table. 2. The collagen extraction technology of chicken by-products: Comparison of sample preparation and extraction methods

Reference	Sample preparation	Extraction
Feet		
Zhou <i>et al.</i> , 2016	Samples were soaked in a solution of 20% NaCl in 0.05 M Tris-HCl (pH 7.5) at a ratio of 1:20. The mixture was cen-trifuged at 10,000 g for 20 min and the precipitate was washed repeatedly with distilled water to remove fats and bubbles.	1. The salt soluble collagen: pretreated samples were soaked in a salt solution (0.45 M NaCl in 0.05 M Tris-HCl, pH 7.5) at a ratio of 1:80 for 48 h. 2. The acid soluble collagen: undissolved matter from salt soluble collagen extraction was soaked in 0.5 M acetic acid at a ratio of 1:80 for 48 h. 3. The pepsin soluble collagen: Undissolved matter from acid soluble collagen extraction was soaked in 0.5 M acetic acid (pH 2) containing 0.1% pepsin (4,500 units/mg) at a ratio of 1:80 for 48 h.
Araujo <i>et al.</i> , 2021	Samples were soaked in a 0.5 M acetic acid solution for 24 h in the ratio of 1:10.	Pretreated samples were homogenized for 10 min at 5,000 g. In hy-drolysis, 1% pepsin was used for 12 h at 4°C with continuous agitation.
Araujo <i>et al.</i> , 2019	Samples were soaked in a 0.3 M acetic acid solution for 24 h in the ratio of 1:10.	Pretreated samples were homogenized for 10 min at 5,000 g. In hy-drolysis, 1% pepsin was used for 12 h at 4°C with continuous agitation.
Potti and Fahad, 2017	Samples were soaked in a 0.1 N NaOH solution for 24 h to remove non collagenous substance and to make the tissue very loose.	Pretreated samples were soaked in 0.5 M acetic acid at a ratio of 1:20 for 48 h at 25°C.
Sternal cartilage		
Akram and Zhang, 2019	1. Samples were soaked in a solution of 20% NaCl in 0.05 M Tris-HCl (pH 7.5) at a ratio of 1:20 to remove the noncollagenous substances, and then washed with distilled water to remove bubbles and fats. 2. Cartilage pieces were soaked in a 0.5 M Na ₂ CO ₃ solu-tion at a ratio of 1:10 to remove pigments. 3. Cartilage pieces was soaked in a 0.3 M EDTA disodi-um salt (pH 7.4) solution at a ratio of 1:10 for 24 h to de-mineralize the cartilage pieces.	Pretreated samples were soaked in a 0.5 M acetic acid at a ratio of 1:6. The pH was adjusted at 2.8 with formic acid and then stirred for 96 h at 4 °C.
Skin		
Zeng <i>et al.</i> , 2013	1. Samples were soaked in a 5% NaCl solution for 12 h in the ratio of 1:10 to reduce noncollagen proteins. 2. The soaked skin samples were washed with distilled water, and then soaked in a 6% Na ₂ CO ₃ solution for 24 h in the ratio of 1:10 to remove the fat.	Pretreated samples were mixed with 1000 volumes of distilled water and 1 g compound enzyme (papain: trypsin: flavourzyme = 1: 1: 1) and then allowed to hydrolyze at 50°C for 3 h.

萃取膠原蛋白的基本架構，首先將原料絞碎，增加原料與溶液的接觸面積。而後將原料浸泡於緩衝液、酸溶液、鹼溶液或鹽溶液中進行樣品前處理。雖然各種文獻的前處理方式有所差異，但主要目的皆是為了去除雜質，例如：以 NaOH 溶液去除雞腳非膠原蛋白 (Potti and Fahad, 2017)；以 Na₂CO₃ 及 EDTA disodium salt 溶液去除雞胸軟骨的色素及礦物質 (Akram and Zhang, 2019)；以 NaCl 及 Na₂CO₃ 溶液去除雞皮的非膠原蛋白及脂肪 (Zeng *et al.*, 2013)。接著將前處理後的樣品進行鹽溶性、酸溶性或酵素溶性萃取。Zhou *et al.* (2016) 探討鹽溶性、酸溶

性或酵素溶性萃取對雞腳膠原蛋白萃取之影響，結果發現膠原蛋白產率以酵素溶性製程表現最佳，其次為酸溶性，而鹽溶性則最差，因此目前膠原蛋白萃取的研究方向多為酵素溶性及酸溶性製程。酵素溶性製程在酵素與醋酸的共同作用下，膠原蛋白以醋酸膨鬆化後，再以酵素進行分解，其產量可達酸溶性製程 3.4 倍，為較具商業化潛力的製程 (Zhou *et al.*, 2016)。此外，Akram and Zhang (2019) 發現超音波處理 (ultrasound-treated) 可進一步提升雞胸軟骨酸溶性膠原蛋白產率，為改善萃取效率的技術。原料分解完畢後，以加鹽鹽析的方式，使蛋白質沉澱，並以透析技術排除鹽分，最後將膠原蛋白進行乾燥即完成萃取製程。膠原蛋白可利用烘乾、噴霧乾燥或冷凍乾燥等方式排除多餘水分，其中冷凍乾燥是保留膠原蛋白功能特性的最佳方法，但若欲降低乾燥成本或提高產量，則可考慮使用噴霧乾燥 (Zeng *et al.*, 2013)。

II. 重要測定項目及應用方向

在評估萃取成效方面，膠原蛋白產率是主要的測定項目，其公式為 (膠原蛋白萃取乾重 / 原料重) $\times 100$ ，數值愈高表示萃取出膠原蛋白的比例愈高。萃取之膠原蛋白會測定一般成分 (水分、粗灰分、粗蛋白、無氮抽出物) 及胺基酸分析，以建立或比對各文獻成分資料。在膠原蛋白之蛋白質特性方面，十二烷基硫酸鈉聚丙烯酰胺凝膠電泳分析 (sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS PAGE) 可用於對比萃取膠原蛋白樣品與標準品之間的電泳環帶 (band) 位置，藉此判定為何種膠原蛋白及純度。傅里葉變換紅外光譜 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、圓二色光譜分析 (circular dichroism spectroscopy)、原子力顯微鏡 (atomic force microscopy) 及掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscopy) 則用於分析膠原蛋白結構 (Zhou *et al.*, 2016; Potti and Fahad, 2017; Akram and Zhang, 2019)。

在評估膠原蛋白應用價值方面，需要依據產品應用方向，制定符合產品目的的測定項目。為探討其應用於製藥、食品或醫材原料之潛力，需建立保水性、吸水性、乳化性、溶解性、吸油性及起泡性等資料。若能進一步建立不同溫度的流變性質 (如黏性及彈性) 則更具參考價值 (Zeng *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2016; Akram and Zhang, 2019)。在生醫敷料應用方面，徐 (2007) 針對膠原蛋白敷料測定色澤、pH、物性、乳化性及離心分離性，並測定抗 UV、抗氧化及皮膚保濕能力，以突顯其應用於敷料之價值。結果顯示，烏骨雞之膠原蛋白較白肉雞膠原蛋白具有更佳的光吸收光譜，且膠原蛋白濃度愈高其抗氧化力亦愈高。實際以皮膚水分蒸散測定儀測定膠原蛋白面霜保濕性，結果發現膠原蛋白面霜顯著降低皮膚水分散失。由此可知，雞隻副產物具有應用於敷料之潛力。Araujo *et al.* (2019; 2021) 將雞腳膠原蛋白應用於低脂雞肉香腸之開發，因此測定感官品評、一般成分、脂肪酸、色澤及口感分析 (texture profile analysis)，結果顯示膠原蛋白可以取代部分油脂且不影響香腸品質，具有成為低脂食品原料的潛力。

其它雞隻羽毛以外之副產物應用文獻

I. 萃取軟骨素及玻尿酸

軟骨素及玻尿酸可廣泛應用於醫療、製藥、化妝品、食品及養身保健 (Uebelhart *et al.* 2004; Volpi, 2009; Srisantisaeng *et al.*, 2013)。而雞隻骨骼組織 (如雞胸軟骨) 富含軟骨素、雞冠富含玻尿酸，經過萃取後可提升其副產物附加價值 (Kogan *et al.*, 2007; Collins and Birkinshaw, 2012; Srichamroen *et al.*, 2013)。因此部分文獻嘗試以軟骨組織 (Srichamroen *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2019b)、肉雞機械去骨副產品 (Nakano *et al.*, 2012) 及雞爪 (Widyaningsih *et al.*, 2016) 來萃取軟骨素，並探討雞冠萃取玻尿酸之可行性 (Rosa *et al.*, 2012; Srisantisaeng *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2017)。

在軟骨素萃取方面，高溫水煮萃取 (100°C 加熱 2.5 hr)、化學萃取 (調整 pH 值至 4.5) 及酵素分解萃取皆可萃取出軟骨素 (Widyaningsih *et al.*, 2016)。但酵素分解萃取耗能較少，且對生態環境較友善，因此目前以此為主要萃取技術 (Nakano *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2019a; 2019b)。Shen *et al.* (2019b) 進一步應用高溫高壓 (120°C, 1.5 hr) 將雞胸軟骨液化並使用複合酵素 (胰蛋白酶及木瓜蛋白酶)，結果證實可改善軟骨素的萃取效率。而雞冠萃取玻尿酸方面，雖然不同文獻條件有差異，但亦以酵素分解萃取法為主 (Rosa *et al.*, 2012; Srisantisaeng *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2017)。雞冠經過細切後，浸泡於丙酮或氯仿-甲醇溶液 (2:1, v/v) 中以去除脂肪及水分 (Rosa *et al.*, 2012; Srisantisaeng *et al.*, 2013)，而後調整適宜的溫度及 pH 值進行酵素分解。軟骨素及玻尿酸的樣品分解後，以陰離子樹脂 (anionic resin) 吸附、膜過濾、離心或蛋白質沉澱等技術 (如三氯醋酸 (trichloroacetic acid) 或乙醇) 分離出雜質 (Srichamroen *et al.*, 2013; Srisantisaeng *et al.*, 2013; Widyaningsih *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2017)。由於硫酸軟骨素及玻尿酸皆含有醣醛酸 (uronic acid) 的結構，因此可利用卡唑反應 (carbazole reaction) 測定醣醛酸含量，進而評估萃取效果 (Nakano *et al.*, 2012; Rosa *et al.*, 2012; Srichamroen *et al.*, 2013; Srisantisaeng *et al.*, 2013; Widyaningsih *et al.*, 2016)。

II. 應用於生物油生產

近年來，部分文獻嘗試探討將廢棄物轉換為生物油，希望藉此將廢棄物轉換為能源 (Maher and Bressler, 2007; Fernandez *et al.*, 2009; Wisniewski *et al.*, 2010)，而雞隻皮膚及脂肪亦為富含油脂的副產物，因此 Idris *et al.* (2015) 探討雞隻皮膚及脂肪的油脂萃取技術。將雞皮及脂肪切碎後，將樣品於 60°C 溶劑中 (己烷和水) 加熱 60 min 進行萃取。結果發現，此方法可成功萃取油脂，且在萃取過程中進行超音波處理可提升 23% 的油脂產量。進一步以 FTIR 分析油脂，結果發現其光譜分析結果與棕櫚油相似，以三酸甘油酯 (triglyceride) 為主要的成分，顯示其具有加工純化成為生物汽油的潛力。

III. 應用於肉加工製品

雞隻為人類重要蛋、肉等食物來源，因此亦有文獻直接將副產物應用於加工製品，其中雞皮及脂肪為較常見研究材料 (Peña-Saldarriaga *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2021)。Peña-Saldarriaga *et al.* (2020) 探討以雞隻脂肪副產物，部分取代乳化型 (emulsion-type) 香腸中雞皮對其產品品質之影響。結果顯示，脂肪取代雞皮會降低香腸水分、提升脂肪含量並影響色澤，但這些影響仍符合哥倫比亞香腸製品的規定。而感官品評方面發現，以脂肪取代 40% 雞皮之香腸顏色、風味和肉味表現較 50% 佳，因此以此為較佳取代量。Lima *et al.* (2021) 探討添加雞皮、脂肪及同時添加雞皮和脂肪對香腸品質之影響。結果顯示，添加雞皮會提升香腸蛋白質含量、硬度、保水能力並減少烹飪損失，而添加脂肪則提升脂質含量並顯示較佳的感官品評可接受性。由上述文獻可知，雞皮及脂肪不但可應用於香腸，而且藉由調整添加比例可改變香腸成分及感官接受度，可作為加工業產品開發的策略技術。

結 論

常用的羽毛再利用技術為水解技術、複合材料技術、熱裂解技術及化學修飾技術。水解技術可分解羽毛蛋白質結構，以供應動物、植物及微生物養分或其他產品原料 (如：抗氧化產品或角蛋白)。複合材料技術是將羽毛與其他材料結合，藉由羽毛強韌、隔熱及纖維的特性來改變材料特性，可改善材料物理性狀、隔熱性或成為紡織原料。熱裂解技術是將羽毛經熱化學轉化為合成氣、生物油和羽毛炭，並主要利用羽毛炭做為污染吸附及電化學材料。化學修飾技術是利用特定化學物質改變羽毛蛋白的結構或官能基，增進吸附性、電化學性或溶解性，進而提升羽毛應用性。

相較於羽毛，其他副產物可能由於成分複雜、難以收集清洗分類及容易腐敗等因素，因此主要以高溫高壓處理技術為主。高溫高壓處理技術可簡單且大量的處理副產物，多應用於飼料原料。而酵素水解技術能保留更多營養或機能性成分，因此附加價值及應用性更佳。萃取純化技術方面，膠原蛋白之文獻較為豐富且萃取條件及測定項目皆已建立完整，可供相關學者及業者參考。而其它應用技術如軟骨素及玻尿酸萃取、生物油生產及肉加工製品技術，更是將羽毛以外副產物的應用潛力，拓展至生醫、藥物、能源及食品領域，呈現出更多元化的應用價值。未來應合理搭配各種再利用技術，以有效提高雞隻副產物資源再利用並增加產品附加價值，進而能兼顧環境保護及產業發展之目標。

參考文獻

- 徐楓雯。2007。利用烏骨雞雞爪萃取含黑色素之膠原蛋白與其功能特性探討。國立中興大學動物科學系。碩士論文。臺中市。
- 陳厚典。2011。以雞腿骨水解物改善勃起功能障礙之研究。國立中興大學動物科學系。碩士論文。臺中市。
- 雷大德。2013。篩選羽毛分解菌進行二階段混合型發酵羽毛粉促進肉雞生長之探討。國立嘉義大學動物科學系。碩士論文。嘉義市。
- 行政院農業委員會。2019。農業統計年報。
- 魏恆巍、許家鳳、陳保基。2005。以試管試驗方法評估國產羽毛粉之品質。中畜會誌。34：39-46。
- Adediran, A. A., I. O. Oladele, T. F. Omotosho, O. S. Adesina, T. M. A. Olayanju, and I. M. Fasemoyin. 2020. Water absorption, flexural properties and morphological characterization of chicken feather fiber-wood sawdust hybrid reinforced waste paper-cement bio-composites. Mater. Today Proc. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1166>.
- Akram, A. N. and C. Zhang. 2019. Effect of ultrasonication on the yield, functional and physicochemical characteristics of

- collagen-II from chicken sternal cartilage. *Food Chem.* 307: 125544.
- Araujo, I. B. S., D. A. S. Lima, S. F. Pereira, and M. S. Madruga. 2019. Quality of low-fat chicken sausages with added chicken feet collagen. *Poult. Sci.* 98: 1064-1074.
- Araujo, I. B. S., D. A. S. Lima, S. F. Pereira, R. P. Paseto, and M. S. Madruga. 2021. Effect of storage time on the quality of chicken sausages produced with fat replacement by collagen gel extracted from chicken feet. *Poult. Sci.* 100: 1262-1272.
- Awachat, V. B., S. Majumdar, A. B. Mandal, and S. K. Bhanja. 2011. Slaughter byproduct yields of poultry, their rendering into poultry byproduct meal, and evaluation of its nutrient composition and aflatoxin content. *Anim. Sci. Report.* 5: 135-140.
- Babalola, R., A. O. Ayeni, P. S. Joshua, A. A. Ayoola, U. O. Isaac, U. Aniediong, V. E. Efeovbokhan, and J. A. Omoleye. 2020. Synthesis of thermal insulator using chicken feather fibre in starch-clay nanocomposites. *Heliyon* 6: e05384.
- Balti, R., A. Bougatef, N. El-Hadj Ali, D. Zekri, A. Barkia, and M. Nasri. 2010. Influence of degree of hydrolysis on functional properties and angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity of protein hydrolysates from cuttlefish (*Sepia officinalis*) by-products. *J. Sci. Food Agric.* 90: 2006-2014.
- Bezus, B., F. Ruscasso, G. Garmendia, S. Vero, I. Cavello, and S. Cavalitto. 2021. Revalorization of chicken feather waste into a high antioxidant activity feather protein hydrolysate using a novel psychrotolerant bacterium. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 32: 101925.
- Chakraborty, R., A. Asthana, A. K. Singh, S. Yadav, M. A. B. H. Susanb, and S. A. C. Carabineiro. 2020. Intensified elimination of aqueous heavy metal ions using chicken feathers chemically modified by a batch method. *J. Mol. Liq.* 312: 113475.
- Cheng, F. Y., Y. T. Liu, T. C. Wan, L. C. Lin, and R. Sakata. 2008. The development of angiotensin I-converting enzyme inhibitor derived from chicken bone protein. *Anim. Sci. J.* 79: 122-128.
- Cheremisinoff, P. N. 1993. Air pollution control and design for industry. New York, USA: Marcel Dekker.
- Collins, M. N. and C. Birkinshaw. 2012. Hyaluronic acid based scaffolds for tissueengineering-a review. *Carbohydr. Polym.* 92: 1262-1279.
- Costa, D. P. S., P. F. Romanelli, and E. Trabuco. 2008. Use of non-edible poultry viscera for the preparation of meat meal. *Food Sci. Technol.* 28: 746-752.
- Dalhat, M. A., S. A. Osman, A. A. Alhuraish, F. K. Almarshad, S. A. Qarwan, and A. Y. Adesina. 2020. Chicken feather fiber modified hot mix asphalt concrete: rutting performance, durability, mechanical and volumetric properties. *Constr. Build. Mater.* 239: 117849.
- Davis, J. G., E. P. Mecchi, H. Lineweaver, and E. C. Naber. 1961. Processing of poultry byproducts and their utilization in feeds. U. S. Department of Agriculture Utilization Research Report no. 3: 40.
- Fagbemi, O. D., B. Sithole, and T. Tesfaye. 2020. Optimization of keratin protein extraction from waste chicken feathers using hybrid pre-treatment techniques. *Sustain. Chem. Pharm.* 17: 100267.
- Fernandez, Y., A. Arenillas, M. A. Diez, J. J. Pis, and J. A. Menendez. 2009. Pyrolysis of glycerol over activated carbons for syngas production. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 84: 145-150.
- Grazziotin, A., F. A. Pimentel, E. V. de Jong, and A. Brandelli. 2006. Nutritional improvement of feather protein by treatment with microbial keratinase. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126: 135-144.
- Gupta, R. and P. Ramnani. 2006. Microbial keratinases and their prospective applications: An overview. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 70: 21-33.
- Gurav, R. G. and J. P. Jadhav. 2012. A novel source of biofertilizer from feather biomass for banana cultivation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20: 4532-4539.
- Hastuti, E., A. Subhan, and A. Auwala. 2020. Performance of carbon based on chicken feather with KOH activation as an anode for Li-ion batteries. *Mater. Today Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.429>.
- Huang, H. J., B. C. Weng, Y. D. Hsuuw, Y. S. Lee, and K. L. Chen. 2021. Dietary supplementation of two-stage fermented feather-soybean meal product on growth performance and immunity in finishing pigs. *Animals* 11: 1527.
- Idris, A. I. M., A. Salmiaton, and R. Omar. 2015. Pyrolysis-solvent extraction of chicken fats and skins for bio-oil production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 37: 2543-2549.
- Jamdar, S. N. and P. Harikumar. 2008. A rapid autolytic method for the preparation of protein hydrolysate from poultry

- viscera. *Bioresour. Technol.* 99: 6934-6940.
- Jeampakdee, P., S. Puthong, P. Srimongkol, P. Sangtanoo, T. Saisavoey, and A. Karnchanatat. 2020. The apoptotic and free radical-scavenging abilities of the protein hydrolysate obtained from chicken feather meal. *Poult. Sci.* 99: 1693-1704.
- Kakonke, G., T. Tesfaye, B. Sithole, and M. Ntunka. 2020. Production and characterization of cotton-chicken feather fibres blended absorbent fabrics. *J. Clean Prod.* 243: 118508.
- Khumalo, M., B. Sithole, and T. Tesfaye. 2020. Valorisation of waste chicken feathers: Optimisation of keratin extraction from waste chicken feathers by sodium bisulphite, sodium dodecyl sulphate and urea. *J. Environ. Manage.* 262: 110329.
- Kogan, G., L. Soltés, R. Stern, and P. Gemeiner. 2007. Hyaluronic acid: a natural biopolymer with a broad range of biomedical and industrial applications. *Biotechnol. Lett.* 29: 17-25.
- Kristinsson, H. G. and B. A. Rasco. 2000. Fish protein hydrolysates: production, biochemical, and functional properties. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 40: 43-81.
- Kruger, R. L., R. M. Dallago, I. N. Filho, and M. D. Luccio. 2009. Study of odor compounds in gaseous effluents generated during production of poultry feather and viscera meal using headspace solid phase microextraction. *Environ. Monit. Assess.* 158: 355-363.
- Li, Z., C. Reimer, M. Picard, A. K. Mohanty, and M. Misra. 2020. Characterization of chicken feather biocarbon for use in sustainable biocomposites. *Front. Mater.* 7: 3. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00003>.
- Lima, J. L., B. B. T. Assis, L. S. Olegario, M. S. Galvao, A. J. Soares, N. M. O. Arcanjo, A. Gonzalez-Mohino, T. K. A. Bezerra, and M. S. Madruga. 2021. Effect of adding byproducts of chicken slaughter on the quality of sausage over storage. *Poul. Sci.* 100: 101178.
- Maher, K. D. and D. C. Bressler. 2007. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals. *Bioresour. Technol.* 98: 2351-2368.
- Nakano, T., Z. Pietrasik, L. Ozimeka, and M. Betti. 2012. Extraction, isolation and analysis of chondroitin sulfate from broiler chicken biomass. *Process Biochem.* 47: 1909-1918.
- Nikhita, R. and N. M. Sachindra. 2021. Optimization of chemical and enzymatic hydrolysis for production of chicken blood protein hydrolysate rich in angiotensin-I converting enzyme inhibitory and antioxidant activity. *Poul. Sci.* 100: 101047.
- Nurdiawati, A., B. Nakhshiniev, I. N. Zaini, N. Saidov, F. Takahashi, and K. Yoshikawa. 2017. Characterization of potential liquid fertilizers obtained by hydrothermal treatment of chicken feathers. *Environ. Prog. Sustain. Energy.* 37: 375-382.
- Nurdiawati, A., C. Suherman, Y. Maxiselly, M. A. Akbar, B. A. Purwoko, P. Prawisudha, and K. Yoshikawa. 2019. Liquid feather protein hydrolysate as a potential fertilizer to increase growth and yield of patchouli (*Pogostemon cablin Benth*) and mung bean (*Vigna radiata*). *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 8: 221-232.
- Oliveira, S. A., B. C. Silva, I. C. Riegel-Vidotti, A. Urbano, P. C. S. Faria-Tischer, and C. A. Tischer. 2017. Production and characterization of bacterial cellulose membranes with hyaluronic acid from chicken comb. *Int. J. Biol. Macromol.* 97: 642-653.
- Onuh, J. O., A. T. Girgih, R. E. Aluko, and M. Aliani. 2014. In vitro antioxidant properties of chicken skin enzymatic protein hydrolysates and membrane fractions. *Food Chem.* 150: 366-373.
- Onuh, J. O., A. T. Girgih, S. A. Malomo, R. E. Aluko, and M. Aliani. 2015. Kinetics of in vitro renin and angiotensin converting enzyme inhibition by chicken skin protein hydrolysates and their blood pressure lowering effects in spontaneously hypertensive rats. *J. Funct. Foods.* 14: 133-143.
- Ouakarrouh, M., N. Laaroussi, and M. Garoum. 2020. Thermal characterization of a new bio-composite building material based on plaster and waste chicken feathers. *Renew. Energy Environ. Sustain.* 5: 2. <https://doi.org/10.1051/rees/2019011>.
- Papadopoulos, M. C. 1985. Processed chicken feathers as feedstuff for poultry and swine. A review. *Agric. Wastes* 14: 275-290.
- Peña-Saldarriaga, L. M., J. A. Pérez-Alvarez, and J. Fernández-López. 2020. Quality properties of chicken emulsion-type sausages formulated with chicken fatty byproducts. *Foods* 9: 507.
- Pfeuti, G., L. S. Brownb, J. G. Longstaffec, F. Peyroneld, D. P. Bureaua, and E. G. Kiariea. 2020. Predicting the standardized ileal digestibility of crude protein in feather meal fed to broiler chickens using a pH-stat and a FTRaman method. *Anim. Feed Sci. Technol.* 261: 114340.
- Potti, R. B. and M. O. Fahad. 2017. Extraction and characterization of collagen from broiler chicken feet (*Gallus gallus*

- domesticus*) - biomolecules from poultry waste. *J. Pure Appl. Microbiol.* 11: 315-322.
- Rahmani-Sania, A., P. Singhb, P. Raizadab, E. C. Limac, I. Anastopoulod, D. A. Giannakoudakise, S. Sivamanif, T. A. Dontsovag, and A. Hosseini-Bandegharaci. 2020. Use of chicken feather and eggshell to synthesize a novel magnetized activated carbon for sorption of heavy metal ions. *Bioresour. Technol.* 297: 122452.
- Rangaraj, V. M., A. A. Edathil, P. Kadirvelayutham, and F. Banat. 2020. Chicken feathers as an intrinsic source to develop ZnS/carbon composite for Li-ion battery anode material. *Mater. Chem. Phys.* 248: 122953.
- Rosa, C. S., A. F. Tovar, P. Mourao, R. Pereira, P. Barreto, and L. H. Beirão. 2012. Purification and characterization of hyaluronic acid from chicken combs. *Cienc. Rural.* 42: 1682-1687.
- Saravanan, K. and C. Prakash. 2018. Effect of processing conditions on flexural strength properties of chicken feather fibre (CFF) and its hybrid composites with polypropylene resin. *J. Nat. Fibers* 17: 933-944.
- Schommer, V. A., B. M. Wenzel, and D. J. Daroit. 2020. Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: effects of manure maturation and microbial pretreatment of feathers on methane production. *Renew Energy* 152: 1284-1291.
- Shen, Q., C. Zhang, W. Jia, X. Qin, X. Xu, M. Ye, H. Mo, and A. Richel. 2019a. Liquefaction of chicken sternal cartilage by steam explosion to isolate chondroitin sulfate. *Carbohydr. Polym.* 215: 73-81.
- Shen, Q., C. Zhang, W. Jia, X. Qin, Z. Cui, H. Mo, and A. Richel. 2019b. Co-production of chondroitin sulfate and peptide from liquefied chicken sternal cartilage by hot-pressure. *Carbohydr. Polym.* 222: 115015.
- Siriorn, I. N. A. and W. Jatuphorn. 2020. Investigation of morphology and photocatalytic activities of electrospun chicken feather Keratin/PLA/TiO₂/Clay nanofibers. *E3S Web of Conferences* 141: 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014101003>.
- Slizyte, R., R. Mozuraityte, O. Martinez-Alvarez, E. Falch, M. Fouchereau-Peron, and T. Rustad. 2009. Functional, bioactive and antioxidative properties of hydrolysates obtained from Cod (*Gadus morhua*) backbones. *Process Biochem.* 44: 668-677.
- Sobucki, L., R. F. Ramos, E. Gubiani, G. Brunetto, D. R. Kaiser, and D. J. Daroit. 2019. Feather hydrolysate as a promising nitrogen-rich fertilizer for greenhouse lettuce cultivation. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 8: 493-499.
- Srichamroen, A., T. Nakano, Z. Pietrasik, L. Ozimek, and M. Betti. 2013. Chondroitin sulfate extraction from broiler chicken cartilage by tissue autolysis. *LWT-Food Sci. Technol.* 50: 607-612.
- Srisantisaeng, P., W. Garnjanagoonchorn, S. Thanachasai, and A. Choothesa. 2013. Proteolytic activity from chicken intestine and pancreas: extraction, partial characterization and application for hyaluronic acid separation from chicken comb. *J. Sci. Food Agric.* 93: 3390-3394.
- Sun, Z., X. Li, K. Liu, X. Chi, and L. Liu. 2021. Optimization for production of a plant growth promoting agent from the degradation of chicken feather using keratinase producing novel isolate *Bacillus pumilus* JYL. *Waste Biomass Valorization* 12: 1943-1954.
- Suna, P., G. Zhua, T. Lia, X. Lia, Q. Shia, M. Xuea, and B. Li. 2020. Acidification chicken feather as sorbent for selectively adsorbing of Cr (VI) ions in aqueous solution. *Mater. Today Commun.* 24: 101358.
- Taghiyari, H. R., R. Majidi, A. Esmailpour, Y. S. Samadi, A. Jahangiri, and A. N. Papadopoulos. 2020. Engineering composites made from wood and chicken feather bonded with UF resin fortified with wollastonite: a novel approach. *Polymers* 12: 857. <https://doi.org/10.3390/polym12040857>.
- Taheri, A., A. A. S. Auvar, H. Ahari, and V. Fogliano. 2013. Comparison the functional properties of protein hydrolysates from poultry byproducts and rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) viscera. *Iran. J. Fish. Sci.* 12: 154-169.
- Tesfaye, T., B. Sithole, and D. Ramjugernath. 2017. Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route-current status and future prospects. *Clean Technol. Environ. Policy* 19: 2363-2378.
- Uebelhart, D., M. Malaise, R. Marcolongo, F. DeVathaire, M. Piperno, E. Mailleux, A. Fioravanti, L. Matoso, and E. Vignon. 2004. Intermittent treatment of knee osteoarthritis with oral chondroitin sulfate: a one-year, randomized, double-blind, multicenter study versus placebo. *Osteoarthr. Cartil. Open.* 12: 269-276.
- Veerapandiana, B., S. R. Shanmugama, S. Varadhana, K. K. Sarwareddyb, K. P. Manib, and V. Ponnusamia. 2020. Levan production from sucrose using chicken feather peptone as a low cost supplemental nutrient source. *Carbohydr. Polym.* 227: 115361.

- Vinodh kumar, S., K. Prasanth, M. Prashanth, S. Prithivirajan, and P. A. Kumar. 2021. Investigation on mechanical properties of chicken feather fibers reinforced polymeric composites. *Mater. Today Proc.* 37: 3767-3770.
- Volpi N. 2009. Quality of different chondroitin sulfate preparations in relation to their therapeutic activity. *J. Pharm. Pharmacol.* 61: 1271-1280.
- Widyaningsih, T. D., W. D. Rukmi, E. Sofia, S. D. Wijayanti, N. Wijayanti, R. Ersalia, N. Rochmawati, and D. Nangin. 2016. Extraction of Glycosaminoglycans containing glucosamine and chondroitin sulfate from chicken claw cartilage. *Res. J. Life Sci.* 3: 181-189.
- Wisniewski, J. A., V. R. Wiggers, E. L. Simionatto, H. F. Meier, A. A. C. Barros, and L. A. S. Madureira. 2010. Biofuels from waste fish oil pyrolysis: chemical composition. *Fuel* 89: 563-568.
- Wongngam, W., T. Mitani, S. Katayama, S. Nakamura, and J. Yongsawatdigul. 2020. Production and characterization of chicken blood hydrolysate with antihypertensive properties. *Poul. Sci.* 99: 5163-5174.
- Yang, Y., Z. Tong, Y. Geng, Y. Li, and M. Zhang. 2013. Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water-retention urea fertilizers. *J. Agric. Food Chem.* 61: 8166-8174.
- Yusuf, I., K. I. Arzai, and A. S. Dayyab. 2019. Evaluation of pre-treatment methods and anaerobic co-digestions of recalcitrant melanised chicken feather wastes with other wastes for improved methane and electrical energy production. *Jordan J. Biol. Sci.* 13: 413-418.
- Zeng, Q., M. Zhang, B. P. Adhikari, and A. S. Mujumdar. 2013. Effect of drying processes on the functional properties of collagen peptides produced from chicken skin. *Dry Technol.* 31: 1653-1660.
- Zhou, C., Y. Li, X. Yu, H. Yang, H. Ma, A. E. A. Yagoub, Y. Cheng, J. Hu, and P. N. Y. Otu. 2016. Extraction and characterization of chicken feet soluble collagen. *Lwt-food Sci. Technol.* 74: 145-153.
- Zier, C. E., R. D. Jones, and M. J. Azain. 2004. Use of pet food grade poultry byproduct meal as an alternate protein source in weanling pig diets. *J. Anim. Sci.* 82: 3049-3057.

The reutilization technology of chicken by-products ⁽¹⁾

Ruei-Han Yeh ⁽²⁾ Meng-Ju Lee ⁽²⁾ Ling-Tsai Wu ⁽²⁾ Chia-Te Chu ⁽³⁾ and Rung-Jen Tu ⁽²⁾⁽⁴⁾

Received: Dec. 30, 2020; Accepted: Jan.11, 2022

Abstract

The purpose of this study was to investigate the reutilization technology of chicken by-product in two parts: feathers and other by-products. Commonly used feather reutilization technologies include hydrolysis technology, composites technology, pyrolysis technology and chemical modification technology. The hydrolysis technology can decompose feather protein into biological nutrients or as raw materials for other products. The composite material technology combines feathers with other materials to change the property of the material, including the physical, thermal insulator and fiber properties. The pyrolysis technology is the thermochemical conversion of feathers into synthesis gas, bio-oil and bio-carbon (feather carbon). Feather carbon can be applied to the adsorption of pollution and electrochemical materials. The chemical modification technology uses chemical substances to change the structure or functional groups of feather proteins, thereby changing the absorptive, electrochemical, or solubility properties. With regard to the research and application of other by-products, high-temperature and high-pressure processing technology can process a large amount of by-products and then can be applied to feed materials. Enzyme hydrolysis technology can retain more nutrients or functional substances, and hence adding value and more applicability in these products. In terms of extraction and purification research, there are abundant sources of literature on collagen extraction, , which can be adopted by researchers and industry practitioners. Moreover, chondroitin sulfate and hyaluronic acid extraction, bio-oil production and meat processing technologies add more diversity to the potential value of by-products. In the future, we should properly adopt the various reutilization technologies to improve the reutilization rate of chicken by-products and increase the added-value of products, thereby to prolong the sustainable development in the ecological environment and industrial operations.

Key words: Chicken, Feather, By-product, Reutilization.

(1) Contribution No. 2691 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Animal Products Processing Division, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(3) Breeding and Genetics Division, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(4) Corresponding author, E-mail: jctu@tlri.gov.tw.