

教育部教學實踐研究計畫成果報告(封面)  
Project Report for MOE Teaching Practice Research Program (Cover Page)

計畫編號/Project Number：PAG107013

學門分類/Division：生技農科

執行期間/Funding Period：2018-08-01 ~ 2019-07-31

(計畫名稱/Title of the Project) 以漆氧化酶為材料設計酵素學探究與實作課程  
(配合課程名稱/Course Name) 酵素學探究與實作

計畫主持人(Principal Investigator)：賴吉永

共同主持人(Co-Principal Investigator)：

執行機構及系所(Institution/Department/Program)：彰化師大生物學系

繳交報告日期(Report Submission Date)：

## 以漆氧化酶為材料設計酵素學探究與實作課程

- 一. 報告內文(Content)(請繳交 3 至 10 頁成果報告, 不含封面、參考文獻、相關佐證附件與連結, 檔案大小以 20mb 為限。)

1. 研究動機與目的(Research Motive and Purpose)

請描述所選擇研究議題的問題挑戰與背景、教學實務現場遇到之挑戰以及該議題的重要性與影響力。

酵素學(enzymology)起源於 1897 年, Edward Buchner 證明酵母菌的萃取液可以在無細胞的條件下催化葡萄糖發酵的反應 (Voet & Voet 1995)。至今酵素學已有超過一百年的歷史, 期間經歷了遺傳學、分子生物學、基因體學、結構生物學等學門的興起與快速發展, 這一些新興學門在今天的生物學世界中都各占有一席之地, 然而酵素化學這一家百年老店面對他們的挑戰與競爭, 憑藉他作為其他學門無可取代之基礎知識的特質, 地位仍然屹立不搖。而隨著生物科技的發展, 新藥開發與擬生科技(biomimetics)等新興領域逐漸成為引領生技產業的主流, 他們與酵素學密不可分的關係更加確立酵素學對生命科學學生的重要性, 對酵素技術的熟悉更有助於畢業生投入主流生物科技產業, 而開設重點核心產業人才培育課程正是本校深耕計畫的重點目標, 培育多元專業人才也是本校中長期校務發展的八大願景之一。

但是酵素學的重要性目前並沒有普遍反應在大學相關科系的課程中, 在大多數醫學、農學或生命科學系所的課程中, 酵素學可能只是生物化學課程中一至兩次的上課內容, 而酵素學實驗只是生化學實驗中零至一次的實驗內容。在課程內容方面, 酵素學經常屬於較不受學生歡迎的項目, 許多生物學系的學生認為酵素學艱澀難懂、枯燥乏味、理論太多、不切實際、可以忽略。實際上酵素學的教學若能配合更有效的線上教學與問題導向的實作學習方式, 讓學生依照自己的理解能力與知識背景調整學習的速度與進程, 應可使酵素學變得不那麼難懂與可怕, 從而了解酵素學與其他生物學門的相關性, 以及作為基礎生物學知識的重要性。

計畫主持人在本校網路教學平台施行非同步線上教學多年, 利用 PowerCam (EverCam)系統錄製線上教學影片, 取代部分實體授課, 以每週或隔週隨堂考的方式, 確保學生按進度登入上課。由最近兩年的結果可以看出, 學生每週觀看線上教學影片的平均時間, 超過實際的課程時數, 學生的平均學業成績也明顯優於以實體授課為主的教學方式。部分學生每週花費時間甚至為教學影片長度的數倍, 顯示學生反覆觀看影片。對於需要深入思考與理解的內容, 非同步線上教學允許學生以符合自己需要的速度觀看教學影片, 必要時可以暫停或反覆播放, 不用擔心跟不上老師講課的速度。網路教學平台更提供學生可以隨時隨地使用行動裝置上網觀看的方便, 更能有效利用零碎的時間, 此點也可以由學生每週登入次數與登入的時間看出。實施期間雖然每學期都有學生在教學意見中要求增加師生實際

互動的時間，但多數學生都肯定非同步線上教學方式較有助於學習困難的內容。

教學實驗是科學教育中不可缺的一環，實驗不但能充實教學的內涵，使教學更為生動有趣，更能養成使用科學方法的技能、提升科學素養、增進科學創造力、與培養解決問題的能力(Hofstein & Lunetta 2004, Wellington 1998)。生物學更是一門實驗與操作的科學，涵蓋的主要範疇不外醫學、農學與生物科技。實際操作在這三個領域的重要性都無庸置疑：實驗課在醫學院、農學院各科系，環境相關科系與生物科技系的課程中均佔有很高的比重；生物相關研究所的教學與評量方式，更都是以實驗為主。所以沒有實驗內容的教學，絕不可能培養出學生對酵素學或其他任何生物學門的素養與運用能力。

但是酵素教學實驗經常受到經費、器材與時間的限制，大學實驗課程中或沒有酵素學的內容，或僅有少數簡單膚淺的實驗與觀察，不能做深入的定量分析，不能觸及核心的酵素學知識與理論，操作的過程也較為單調重複，更比不上其他生物學實驗項目能利用物種或構造上的多樣性帶來較多感官的刺激。實際上酵素學實驗若能找到適合的材料，以探究式學習的方式進行，在內容上與理論教學互相配合，學生應該能夠更加投入實驗的進行，並有效地幫助學生了解相關的酵素學理論，看到表象之下更清楚明確的機制和定量關係，呈現出酵素學吸引人的一面，使學生更能將相關的技術與知識內化。

計劃主持人在大學部開設微生物免疫學實驗多年，近年在實驗課程中逐漸加入探究式教學實驗。兩者相較，食譜式實驗明列實驗目的與實驗方法、以獲得預先設定的實驗結果為目標、依照既定的步驟順序進行；探究式實驗則以回答與解決預先設定的問題為目標、不明確規範實驗進行的步驟、實驗的問題也不一定有標準答案、學生在操作時需先經過自主的思考、討論與嘗試，確立方法後才能進行操作獲得結果。因此探究式教學實驗具體地融入了 Conceive (構思)、Design (設計)、Implement (實施)、Operate (操作) 的 CDIO 理念。在微生物免疫學實驗課程中，探究式教學實驗與食譜式教學實驗交替出現在每一學期課程中，實施期間每一學期均有學生在教學意見中要求增加探究式實驗的次數。有趣的是，協助實驗課程的助教卻傾向於減少探究式實驗，較偏好食譜式教學實驗。可能因學生與助教在教學實驗實施時追求的目標與重視的面向不同所致。

造成酵素學教學實驗不足的原因，除了酵素學可算是介於生物學與化學之間的跨領域地帶之外，更重要的因素是酵素教學實驗在實施上的困難。酵素實驗通常需要使用適當純度的酵素與化合物(酵素的受質)。純的酵素與受質經常是價格昂貴且不穩定的試劑，需要特殊的儲存條件與場所，也不容易長期保存。而測量酵素反應的方式通常是檢查反應物濃度的降低，或是產物濃度的上升，因為大多數酵素的受質與產物都是沒有顏色的化合物，肉眼無法看出反應的發生與進行，這一些測量經常需要使用較昂貴的儀器，例如紫外光分光光度計、螢光光度計、氣相層析儀、液相層析液、甚至層析質譜儀。儀器與試劑的高昂價格，使得在研究所以下的年級進行酵素教學實驗變得非常不實際。

計劃主持人擔任大學部普通生物學、微生物學與生物技術實驗課程的教學工作已達二十年，經常感到學生對酵素學非常陌生，同時教學實驗內容中也缺少以

酵素為主題的實驗，雖不斷思索與尋找適當的酵素題材，卻大多因經費與設備無法配合而作罷。近幾年研究領域增加了白腐真菌的木質分解酵素，主要包括糖苷水解酶與氧化還原酶兩大類，發現其中屬於氧化還原酶的漆氧化酶，具有酵素教學實驗所需要的各種特質，是作為酵素實驗教學的絕佳材料，因而引起以其為中心設計「酵素學探究與實作」課程的動機。「探究與實作」是十二年國教自然科的新增課程，計畫主持人也與本校科學教育研究所溫嫩純教授合作，利用漆氧化酶進行了中學科學探究與實作課程的開發與評量(張珮珊等 2017)。師資培育是彰化師大的主要特色，因此本課程也能培養本校師資生未來指導中學自然科「探究與實作」的能力。

## 2. 文獻探討(Literature Review)

請針對本教學實踐研究計畫主題進行國內外相關文獻、研究情況與發展或實作案例等之評析。

目前在大學教學實驗課程中常使用的酵素包括澱粉酶(amylase)、觸酶(catalase)、多酚氧化酶(catecholase)、蔗糖酶(invertase)、木瓜酵素(papain)、果膠酶(pectinase)、胃蛋白酶(pepsin)、凝乳酶(rennin) (Miller 1992, Morholt et al. 1966)。其中澱粉酶、蔗糖酶、木瓜酵素、果膠酶、胰蛋白酶、與凝乳酶屬於水解酶(hydrolases)；觸酶和多酚氧化酶則屬於氧化還原酶(oxidoreductases)。他們的反應或可利用呈色劑檢察反應物或產物濃度的變化，例如澱粉酶的反應可使用碘液、澱粉酶與蔗糖酶(invertase)可使用本氏液(Benedict's solution)；或可利用本身發生顏色變化的反應物，例如多酚氧化酶可使用磷苯二酚(catechol)做為受質(Allan et al. 1983)；或利用形質發生改變的反應物，例如胃蛋白酶可以讓吉利丁(gelatin)塊或熟蛋白塊溶解、觸酶可使雙氧水產生氣泡、果膠酶可以讓蘋果汁清澈、凝乳酶可以讓牛奶凝固(Mader 1982)。這些方式中有一些只能做定性的觀察，無法做定量分析，例如以碘液檢查澱粉酶(Xiao et al. 2006)、以蘋果汁檢查果膠酶、以雙氧水檢查觸酶、以吉利丁檢察胃蛋白酶或木瓜酵素、以牛奶檢察凝乳酶；另一部分使用呈色劑者則步驟較為繁複，花費也偏高，例如以本氏液檢查蔗糖酶；而使用本身發生顏色變化的反應物，則經常酵素和受質的價格都偏高，例如多酚氧化酶。

漆氧化酶(EC 1.10.3.2)是一種含銅的氧化酶，1883 年被日本科學家吉田發現於漆樹的樹汁中，是漆樹汁接觸空氣後發生硬化反應的主要催化劑(Yoshida 1883)。將漆樹樹汁塗抹在器皿與家具表面，待樹汁硬化後加以打磨，就會成為外表堅硬亮麗的漆器。東亞各國的漆器產業有上千年歷史，因此漆氧化酶可以算是人類最早應用於工業生產的酵素。漆氧化酶作用的主要對象(受質)是小分子的酚類化合物，將它們氧化產生自由基，引發後續的自由基反應，在生物體內這樣的反應參與植物合成木質素、真菌分解木質素、節肢動物形成外骨骼、植物與微生物合成色素、氧化與代謝金屬離子、分解毒素、產生孢子等反應(Boerjan et al. 2003)，漆氧化酶在工業上也有許多應用方向，包括造紙業、紡織業、食品業、化工業、汙染物處理與生質能產業…等(Piscitelli et al. 2010, Singh Arora & Sharma 2009)。

漆氧化酶作為教學使用的優勢包括：(1)可作用的受質種類繁多且為穩定的芳香族化

合物，即使在室溫儲存的有效期也可達數年之久。其中許多化合物也可作為食品添加劑、藥品或化工原料，因此價格低廉，以愈創木酚(guaiacol)為例，Sigma-Aldrich Co. LLC. 公司一公斤的包裝(產品編號 G5502)訂價為 51.5 美元，足夠做  $5 \times 10^6$  次標準的漆氧化酶活性測定實驗。(2) 酵素來源多，容易取得且穩定性高：若使用白腐真菌的漆氧化酶，因為屬於分泌到細胞外的醱化酵素，穩定性遠比一般細胞內酵素高，對溫度、酸鹼性與鹽濃度的耐受範圍大，因此容易保存。可使用簡便的方法由野外篩選能生產漆氧化酶的菌種，並由菌絲體的培養液中獲得大量酵素。若不希望自行培養微生物或純化蛋白質，直接購買酵素也有許多選擇，例如 Sigma-Aldrich 公司一公克包裝，試劑等級的純化雲芝(*Trametes versicolor*)漆氧化酶(產品編號 38429，比活性  $>0.5$  U/mg)定價為 99.8 美元，約可進行一萬次標準的反應測定，若需求量較大則可以購買價格更低的工業用酵素，如 Novozyme 公司的 DeniLite® 酵素(Berka et al.1997)。(3) 酵素容易純化，只要使用簡單、可手工操作且價格合理的親和性層析法，配合一般大學實驗室都有的離心機等設備，即可獲得接近純質的漆氧化酶。(4) 酵素反應容易測定，許多芳香族的受質在反應時伴隨明顯的顏色變化，因此只要比對色表就可以做粗略的定量實驗，如果能配合簡單的比色計(價格約新台幣兩萬元以內)，就可以進行定量分析決定反應速度。更重要的是漆氧化酶催化反應物與氧氣的反應，因此可以用溶氧度計測量溶液中溶氧濃度的改變，直接精確地計算出反應速率與酵素活性，而溶氧度計低廉的價格(約新台幣 7000 元)更是使用漆氧化酶最大的優勢。(5) 相關研究資料豐富，從生化特性、基因序列、蛋白質結構、真菌基因體資料、到漆氧化酶專屬的資料庫 (Sirim et al. 2011)，眾多的中英文學位論文與研究報告，可供有興趣的學生作更深入的探討。(6) 眾多的工業運用，可供學生在實驗時實際嘗試，增加對酵素知識的興趣，並有助於體會酵素知識的實用性與重要性。

### 3. 研究方法(Research Methodology)

可包含實驗場域、研究對象、研究架構、資料蒐集方法與工具與分析方法等項目，但不限於列舉內容。

本計畫編製了「酵素學探究與實作」課程的教材，教學對象為生物學系四年級學生及研究生，課程由六個單元組成，每個單元進行三週，每週兩小時，第一週為非同步網路授課，使用本校網路教學平台(<https://dlearn.ncue.edu.tw/mooc/index.php>)與 EverCam 軟體製作的視訊教材，第二和第三週進行一個與授課內容相關的教學實驗，以漆氧化酶為主要實驗材料，共實施一次課程前測與六次後測(隨堂考試)，後測於每個單元實驗課程開始(第二週)時舉行，學期成績以隨堂考成績(50%)與實驗報告成績(50%)計算。六個單元的主題為：(一)酵素簡介、(二)酵素作用機制、(三)酵素反應範例、(四)漆氧化酶、(五)酵素動力學、(六)酵素抑制劑。

課程中使用的線上教學投影片列於附件一。

課程中使用的實驗講義列於附件二。

課程中使用的測驗題列於附件三。

### 4. 教學暨研究成果(Teaching and Research Outcomes)

## (1) 教學過程與成果

依照本計畫內容於 107 學年度第二學期於彰師大生物學系開設「酵素學探究與實作」課程，該課成為大碩合開：共有四位碩士班學生與八位生物學系四年級學生選修。碩士班四位學生的學期成績平均為 87.5，大學部八位學生的學期成績平均為 87.8。

在蒐集資料與編製教材的過程中，參考 Anderson et al. (1944) 的研究結果，在第二單元中利用 *p*-nitrophenyl acetate 的水解反應設計「實驗二、酵素反應的平衡常數、反應速率常數、 $\Delta G^0$  與  $\Delta G^\ddagger$ 」，由學生設計實驗方法測量反應的速率與平衡常數，取代原本規劃的第二單元的實驗「酵素反應的最佳條件」。並以糜蛋白酶(chymotrypsin) 水解 *p*-nitrophenyl acetate 的反應為題材設計「實驗三、糜蛋白酶的酵素動力學研究」，取代原本規劃的第三單元的實驗「測量酵素反應速率」。原本第三單元實驗「測量酵素反應速率」的內容則成為更新後「實驗四、漆氧化酶」實驗內容的一部分，取代原本規劃第四單元的實驗「酵素的生產與純化」。本計畫申請計畫書中原來的規劃是以計畫主持人於 102 年度執行科技部科普計畫「以漆氧化酶作為酵素教學實驗的題材」的內容為基礎，該科普計畫的實施對象為高中學生與社會人士，因此內容強調輕鬆趣味與生活化，然而本計畫是以研究生為主要對象的專業課程，需要對酵素學原理做更深入的探討，而原本的實驗「酵素反應的最佳條件」僅需要學生配製不同 pH 值的緩衝液，並觀察漆氧化酶在各個緩衝液中反應速度(顏色變化)的差異，在原理上甚為簡單，考量學生必須對化學平衡、反應速率、平衡常數、速率常數的意義有更深入與清楚的了解，因次利用乙酸對硝基酯(*p*-nitrophenyl acetate)在水溶液中能緩慢地自發性水解，或以酯酶(如脂肪水解酶)快速水解達成平衡，且水解後產生具有顏色的產物的特性，讓學生設計實驗測出反應平衡常數及順向與逆向反應的自發速率常數，學生會在設計與操作中得到對比爾定律(Beer's Law)、吸光係數(extinction coefficient)、化學平衡、反應速率、平衡常數、速率常數更清楚與深入的了解。

本研究的前測共有 60 題單選題，其中 1-10 題即為第一單元的隨堂考試題(第一次後測)，11-20 題即為第二單元的隨堂考試題(第二次後測)，依此類推，學生在前測的成績統計如表一。學生在後測的成績統計如表二。

表一、學生在「酵素學探究與實作」課程前測表現的統計數值

題數	樣本數	平均數	中位數	最小值	最大值	標準差
1-10	12	4	4	2	7	1.53
11-20	12	4	4	1	5	1.27
21-30	12	3	3	1	5	1.27
31-40	12	3	3	1	5	1.47
41-50	12	3	3	1	5	1.08
51-60	12	3	3	1	4	0.89

表二、學生在「酵素學探究與實作」課程後測表現的統計數值

題數	樣本數	平均數	中位數	最小值	最大值	標準差
1-10	10	5.5	6	3	7	1.51
11-20	11	3.73	4	1	7	1.90
21-30	10	5.3	5	3	8	1.95
31-40	10	4.1	4	3	5	0.74
41-50	6	5.17	5	3	9	2.23
51-60	9	4.78	5	2	8	1.99

使用成對雙樣本平均數差異 t 檢定比較前測與後測的結果，統計結果如表三。

表三、以成對雙樣本平均數差異 t 檢定比較前測與後測結果的統計

題數	T 值	自由度	臨界值	p 值	樣本平均數與母體 平均數的差異
1-10	3.5277	7	1.645	0.0048**	2.000
11-20	0.6644	8	1.645	0.2626	0.444
21-30	2.9448	8	1.645	0.0093**	2.556
31-40	5.0170	7	1.645	0.0008***	1.625
41-50	4.7001	3	1.645	0.0091**	2.250
51-60	2.2504	7	1.645	0.0296*	1.875

## (2) 教師教學反思

除第二單元的題組(11-20 題)之外，有足夠的統計證據支持其他單元題組後測的答對題數均優於前測的答對題數。而第二單元正是有關反應化學平衡、反應速率、平衡常數、速率常數等重要觀念的單元，也是相較於其他單元較難理解與掌握的單元，顯示本課程在此單元的教學成效仍有待改進，將來應該將此單為更細分為兩個或更多個單元，減少每個單元內容的分量，分配更多的時間，做更深入的說明並進行更多個相關實驗的操作。

## (3) 學生學習回饋

選修本課程的碩士班學生的教學評量結果如圖一。選修本課程的大學部學生對本課程的教學評量結果如圖二。教學評量的總平均分別為 4.87 與 4.7 (滿分為 5)。

學生繳交的實驗報告實例列於附件四。

國立彰化師範大學 107學年度 第2學期 教學意見反應問卷結果

問卷類型：一般課程(General course)  
 科目名稱：(24056)酵素學探究與實作  
 授課教師：賴吉永  
 開課班級：生碩一 修課人數：4人 填答人數：3人 填答率： 75.00% 全答(1)的人數：0  
 列印日期：2019/8/12

個人基本資料

(1)	(2)				(1)女 (2)男
1	2				性別
(1)	(2)	(3)			(1)學士班(2)研究所(碩、博班)(3)在職碩士專班
1	2	0			學制
(1)	(2)	(3)	(4)		(1)一年級(2)二年級(3)三年級(4)四年級
2	0	0	1		年級
(1)	(2)				(1)必修(2)選修
0	3				課程類型

學生自我學習評量

(1)	(2)	(1)(2)

教學評量

平均	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)完全不同意 (2)不同意 (3)普通 (4)同意 (5)完全同意
5.00	0	0	0	0	3	教師能依教學大綱授課，讓學生瞭解學習重點。
4.67	0	0	0	1	2	教師教學內容具學習價值。
4.67	0	0	0	1	2	教師關心學生學習狀況，能適時與學生討論給予回饋。
4.67	0	0	0	1	2	老師很少無故缺課或遲到早退。
5.00	0	0	0	0	3	教師於教學時能尊重性別平等，不會有性別差異或性別歧視之言語、舉止、態度。
5.00	0	0	0	0	3	教師對學生的成績評分標準有依據且合理。
5.00	0	0	0	0	3	教師的講解示範條理分明、清晰流暢。
5.00	0	0	0	0	3	教師具備教授本課程之專業知識。
4.67	0	0	0	1	2	本課程有助於我知識或專業能力之提升。
5.00	0	0	0	0	3	整體而言，我修習本課程獲益良多。
總平均： 4.87						

[其他具體建議]註：對於教學評量中之性別差異題，若回答1(完全不同意)，亦請補充說明之  
1、

圖一、本計畫開設「酵素學探究與實作」課程碩士班教學評量結果

國立彰化師範大學 107學年度 第2學期 教學意見反應問卷結果

問卷類型：一般課程(General course)  
 科目名稱：(24034)酵素學探究與實作  
 授課教師：賴吉永  
 開課班級：生四 修課人數：8人 填答人數：7人 填答率： 87.50% 全答(1)的人數：0  
 列印日期：2019/8/12

個人基本資料

(1)	(2)				(1)女 (2)男
3	4				性別
(1)	(2)	(3)			(1)學士班(2)研究所(碩、博班)(3)在職碩士專班
7	0	0			學制
(1)	(2)	(3)	(4)		(1)一年級(2)二年級(3)三年級(4)四年級
0	0	0	7		年級
(1)	(2)				(1)必修(2)選修
0	7				課程類型

學生自我學習評量

(1)	(2)	(1)(2)

教學評量

平均	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)完全不同意 (2)不同意 (3)普通 (4)同意 (5)完全同意
4.86	0	0	0	1	6	教師能依教學大綱授課，讓學生瞭解學習重點。
4.71	0	0	0	2	5	教師教學內容具學習價值。
4.57	0	0	1	1	5	教師關心學生學習狀況，能適時與學生討論給予回饋。
4.57	0	0	0	3	4	老師很少無故缺課或遲到早退。
4.86	0	0	0	1	6	教師於教學時能尊重性別平等，不會有性別差異或性別歧視之言語、舉止、態度。
4.71	0	0	0	2	5	教師對學生的成績評分標準有依據且合理。
4.71	0	0	0	2	5	教師的講解示範條理分明、清晰流暢。
4.86	0	0	0	1	6	教師具備教授本課程之專業知識。
4.57	0	0	0	3	4	本課程有助於我知識或專業能力之提升。
4.57	0	0	1	1	5	整體而言，我修習本課程獲益良多。
總平均： 4.70						

[其他具體建議]註：對於教學評量中之性別差異題，若回答1(完全不同意)，亦請補充說明之  
1、

圖二、本計畫開設「酵素學探究與實作」課程教學大學部評量結果



## 二. 參考文獻(References)

- 張珮珊、賴吉永、溫嫵純。2017。科學探究與實作課程的發展、實施與評量：以實驗室中的科學論證為核心之研究。科學教育學刊 25: 301-335。
- Anderson, J., T. Byrne, K. J. Woelfel, and J. E. Meany. 1994. The hydrolysis of *p*-nitrophenyl acetate: a versatile reaction to study enzyme kinetics. *J. Chem. Educ.* 71:715-718.
- Allan, M. A., S. Aneja, F. R. Armstrong, R. A. Garcia, D. R. Helms, R. N. Holmes, S. B. Miller, A. D. Smith, D. J. Stroup, W. M. Surver, and C. K. Wagner. 1983. *General biology: A laboratory manual for Biology 105*. Contemporary Publishing Co., Raleigh, North Carolina, 265 pages.
- Berka, R., P. Schneider, E. Golightly, S. Brown, M. Madden, K. Brown, T. Halkier, K. Mondorf, and F. Xu. 1997. Characterization of the gene encoding an extracellular laccase of *Myceliophthora thermophila* and analysis of the recombinant enzyme expressed in *Aspergillus oryzae*. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:3151-3157.
- Boerjan, W., J. Ralph, and M. Baucher. 2003. Lignin biosynthesis. *Annu. Rev. Plant Biol.* 54: 519-46.
- Hofstein, A., and V. N. Lunetta. 2004. The laboratory in science education: foundations for the twenty-first century. *Sci. Educ.* 88:28-54.
- Mader, S. S. 1982. *Laboratory manual for Inquiry Into Life*. Third edition. W. C. Brown Co., Dubuque, Iowa, 335 pages.
- Miller, S. B. 1992. Simple enzyme experiments. pp. 153-161, in *Tested studies for laboratory teaching*, Vol. 6 (C.A. Goldman, S.E. Andrews, P.L. Hauta, and R. Ketchum, Editors). *Proceedings of the 6th Workshop/Conference of the Association for Biology Laboratory Education (ABLE)*, 161 pages.
- Morholt, E., P. F. Brandwein, and A. Joseph. 1966. *A sourcebook for the biological sciences*. Second edition. Harcourt, Brace, and World Inc., New York, 795 pages.
- Piscitelli, A. C. Pezzella, P. Giardina, V. Faraco, and S. Giovanni. 2010. Heterologous laccase production and its role in industrial applications. *Bioeng. Bugs* 1: 252-262.
- Singh Arora, D., and R. Kumar Sharma. 2009. Ligninolytic fungal laccases and their biotechnological applications. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 160:1760-1788.
- Sirim, D., F. Wagner, L. Wang, R. D. Schmid, and J. Pleiss. 2011. *The Laccase Engineering Database: a classification and analysis system for laccases and related multicopper oxidases*. Database (Oxford). 2011: bar006.
- Wellington, J. 1998. Practical work in science: time for a reappraisal. In J. Wellington, (Ed.), *Practical work in school science: Which way now?* pp. 3-15. Routledge (London, UK).
- Voet D. and J. D. Voet. 1995. *Biochemistry*. John Wiley & Sons, Inc.
- Yoshida, H. 1883. Chemistry of lacquer (Urushi). Part I. Communication from the Chemical Society of Tokio. *J. Chem. Soc. Transact.* 43: 472-486.
- Xiao Z, Storms R, Tsang A. 2006. A quantitative starch-iodine method for measuring

alpha-amylase and glucoamylase activities. Anal Biochem 351:146-148.

### 三. 附件(Appendix)

與本研究計畫相關之研究成果資料，可補充於附件，如學生評量工具、訪談問題等等。

附件一、「酵素學探究與實作」課程線上教學投影片

附件二、「酵素學探究與實作」實驗講義

附件三、「酵素學探究與實作」測驗題

附件四、「酵素學探究與實作」學生實驗報告實例