

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

計畫編號/Project Number：PEE107109

學門分類/Division：工程數理

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

以問題導向、團隊導向及電腦輔助學習為核心的化工專業教學
配合課程名稱/Course Name：質能平衡

計畫主持人(Principal Investigator)：蔡偉博

共同主持人(Co-Principal Investigator)：

執行機構及系所(Institution/Department/Program)：臺灣大學化工系

繳交報告日期(Report Submission Date)：

September 20, 2019

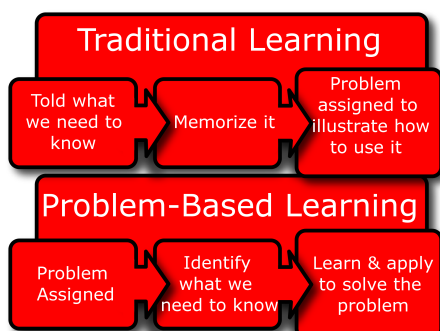
一. 報告內文(Content)

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

本計畫的研究主題為化工系必修專業課目教學方式的改進研究，嘗試以「問題導向教學」、「團隊導向教學」以及「電腦輔助解題」為核心的教學方式，以提高學生的學習興趣、增加學生的學習效率、訓練同學團隊合作的技能和領導才能、及自我永續學習的能力。

2. 文獻探討(Literature Review)

為了提高學生的學習動機，本計畫採用「問題導向學習」(Problem-based Learning, PBL) [1]。這是根據建構主義的觀點 (constructivist view)，認為學習是在社會環境中建構知識的過程，而不僅僅是獲取知識。傳統的教學是由教師選擇他認為需要學的知識，在課堂上講述給學生聽，學生了解並且記憶起來這些知識，課後教師給予能夠應用這些知識的問題，以評估學生的學習成果 (圖一)。而 PBL 則是在為傳授為傳授這些知識前先給予問題，同學先分析問題，辨識解決這些問題所需要的知識，然後學習這些知識並且應用這些知識解決問題。PBL 與其他同樣以問題為中心之教學法 (例如：個案教學法，Case Method) 不同的地方是，在 PBL 中，提出問題之時間在學習者學習所應學之基本概念之前，藉由問題引起學習者之興趣，幫助學習者以問題為焦點，搜尋所須了解之知識與資訊，進而解決問題。而個案教學法則是在學習者已具備基礎知識後，才分析及解決問題。



圖一、傳統教學法與問題導向學習法的差異。

(http://www.siu.edu/facultycenter/services_resources/teaching/pbl.shtml)

換言之，PBL 是將以教導者為中心的教學活動，改成以學生為中心的教學方式，是一種挑戰學生「學會學習」(learning to learn) 的教學活動，教師透過解決一個開放式的問題，來刺激學生的思考，提供學生主動參與議題討論之機會，並透過教師的回饋與協助，使學生獲得新知。「問題導向學習」的過程並不聚焦於解出一個有固定答案的問題，而是在此過程中發展所欲培養的技能與特性，包括知識的獲取、團隊合作與溝通能力的提升。在 PBL 教學中，教師主要扮演著激勵者和觀察者的角色，而學生在小組中共同找尋真實世界問題的解決方案，更重要的是發展學生成為自我引導學習者的能力。因此，「問題導向學習」的目標是解決能力的學習，而不僅是知識的學習而已。過去，這種教學法在醫學教育中開始，並且廣泛使用[2]，也漸漸擴展到其他學科。在化工教育中，國外只有極少數學校應用在部分的課程中，非常不普遍。

從上個世紀八十年代開始，加拿大 McMaster University 化工系決定要改變教學的策略，減少要求的科目，而強調要建立學生終身學習的能力，期望畢業的學生在未來工作上可以有效及有效率的自我學習到所需要的知識。[3] 因此，Woods 開始使用 PBL，他先從化工系的兩門必修課開始。他提出了在大班級中實施 PBL 的九項必須審慎考慮的因素：[3]

- (1) 系上教授的接受度：教授們是否願意將其課程或其中的一部分使用 PBL 的方法來傳授。
- (2) 同學的接受度：學生會因為不適應課程教學方法改變，而放棄修這門課。
- (3) 什麼時候及如何建立同學接受這種教法所需要的技巧：學生需要具備基本的解題能力，團隊工作，自省及學習的能力，才足以接受這種教學方法。因此，需要審慎評估學生的能力後，適當的使用 PBL 教學。
- (4) 如何協助學生在無人指導下的討論，以及如何監督學生討論的有效性：由於班級人數較多，一個教授甚至加上一兩位助教，無法兼顧所有的小組討論，因此如何引導學生在無人監督的情況下可以有效的討論，是一項挑戰。
- (5) 如何使學生在繁忙的化工傳統教學中，願意使用 PBL：化工系的課程非常繁重，學生同時修幾門必修課，其負擔不言而喻。如果在同時修幾門傳統教學的課程中，學生是否會犧牲 PBL 的課程活動，教師要如何避免這種情況的發生。
- (6) 如何監控一個正向的學習環境：需要使用一些工具來衡量學生是否有正向的學習態度，同時與傳統教學相比較。
- (7) 調整學習知識或技能的態度：PBL 的目的在於要求學生透過一個科目的學習來獲得終生學習的技巧，解決問題的策略，團隊工作的能力，以及自我評估的能力。因此，如果以傳統的考試方式，學生的成績可能比傳統教學還差，因此需要在評量學生成績的方法也需要調整。
- (8) 解題量減少：PBL 教學跟傳統教學相比較，學生所做的習題量將減少，因此對於解題的熟悉度會減少，因此需要尋找方法使學生了解題型與解法。
- (9) 辨識問題的技能：傳統的教法，教師決定學習的主題與目的，因此學生很容易了解課程的目標。在 PBL 中，如果在題目中就標註目的，學生自然容易了解問題的核心。不過，訓練學生從題目中辨識課程的目標，也是一項重要的工作。

PBL 課程的設計可以參考 Wier 所提出了 10 個步驟（見下表）[4]

Table 1. Ten general steps of curriculum design in problem-based learning (PBL)

1. Give the rationale for the curriculum and form a curriculum planning group
2. Generate general educational objectives of the curriculum
3. Assess the educational needs of future students
4. Apply the educational principles of PBL to the curriculum
5. Structure the curriculum and generate a curriculum blueprint
6. Elaborate the unit blueprints
7. Construct the units
8. Decide on student assessment methods
9. Consider the educational organization and curriculum management
10. Evaluate the curriculum and revise it (when necessary)

1. 提出創新課程的理由及組成課程規劃小組
2. 形成創新課程的教育目標

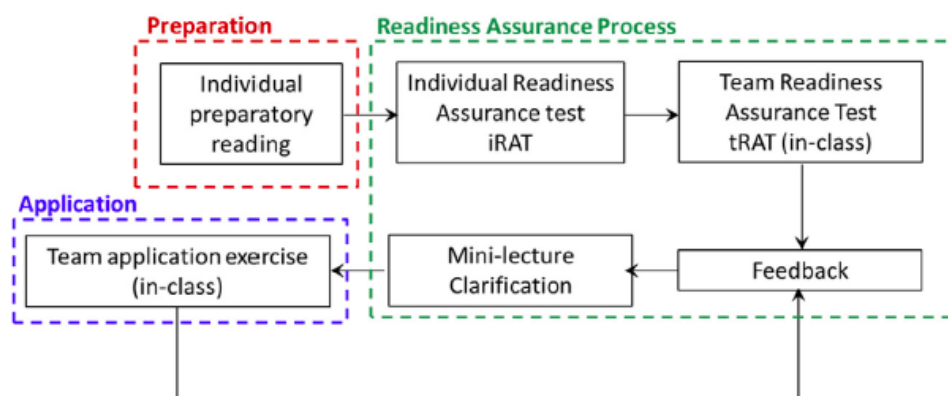
3. 評估未來學生的教育需要
4. 將問題導向學習的教學原則導入於創新課程中
5. 提出創新課程的架構及產生課程藍圖
6. 詳細制訂各單元藍圖
7. 完成各單元的架構
8. 決定學生的評量方法
9. 思考教育組織與課程經營
10. 評估創新課程及修正

這些顧慮與原則都可以做為設計 PBL 教學的借鏡。

PBL 強調小組學習，同組的成員必須彼此分享知識與分擔責任，一起合作以解決真實問題，透過此學習歷程，學生可以獲取新知，並且熟悉問題解決技巧、團隊領導及溝通能力等。由於 PBL 的操作方式會使用到小組學習，因此與團隊導向學習法（Team-based Learning, TBL）有重疊之處。所以在設計 PBL 課程時，也必須使用到 TBL 的元素。「團隊導向學習法」則是一個不同於所謂團體學習的方法，不單是在一般課程中加入一些團體活動或作業，而是一個整體性、系統性的教學與學習策略，包含了整體課程設計上的改變，在課堂上要求學生將注意力放在應用知識，而不僅僅是吸收新的知識[5]。TBL 強調團隊工作，對於工程專業來說是非常重要，因為現在工程界的複雜程度，必須倚賴工程師們的團隊合作來達成，這也是本系教育目標所要達到的目的。

「團隊導向學習法」在 1982 年被揭露可以促進「大團體」教學中享有「小團體」教學的優點，例如提高學生投入課程學習的熱誠，及對於知識記憶的保存[6]。TBL 須包含四個元素[7]：(1) 有策略性將學生分成 5-7 人的固定團體；(ii) 學生準備就緒的確認程序（Readiness Assurance Process）；(3) 仔細設計課堂上的活動與作業以發展學生的批判性思考之技能；(4) 創造及實施同儕間的互評及回饋機制。

TBL 的操作程序如圖二所示[8]：首先，學生會有課前功課，使學生能熟悉該單元的重要觀念；接下來，在課堂上，學生一開始先接受個人的「準備度測驗」（Individual Readiness Assurance Test, iRAT），以檢視同學的預習成果；緊接著，同學們分組進行團隊的「準備度測驗」（Team Readiness Assurance Test, tRAT），得到共同的答案。此項測驗的目的有兩個，第一是隊友間可以互相傳遞知識；第二是刺激同學間競爭以提升學習動機。接下來，教師對於學生不清楚的地方提供即時且簡短的回饋。最後，教師給同學較進階的題目，在課堂中以團隊的方式來解題。



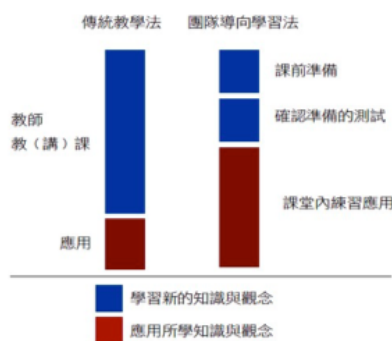
圖二、TBL 的操作程序[8]

在設計問題上必須非常費心，以提高學習的層次。Michaelsen and Sweet 提出問題的四個 S 策略[9]：1) 有意義的問題 (Significant problem) — 這些問題必須有意義，以及夠複雜，以促進同學在團體中的討論；2) 相同的問題 (Same problem) — 所有的組別應做同樣的問題，可以使得他們與其他組比較答案；3) 特定的選項 (Specific choice) — 雖然開放性的問題可以使得討論更加熱烈，在應用練習上仍應該使用有特定選擇的問題，可以使同學聚焦在團隊合作完成一個任務；4) 同時報告 (Simultaneous reporting) — 所有的團隊應該同時交出答案，使得大家可以更專注在解出問題，不會有抄襲別組答案的現象。

在 TLB 教學中，最後一項必要的元素是同儕之間的評鑑，主要的目的是看個人是否對團隊負責，以及是否有社交困擾的問題。在過去教學經驗中，曾經在課程中給予團體作業，從學生的回饋中發現，有的同學被所有同伴認定對團隊幾乎沒有貢獻，可是他卻自認做了許多工作。如此認知上的差異，事實上跟人際溝通是有關係的。藉由學生回饋可以了解這些差異，及早因應，使學生們能夠有好的團隊合作。有三種被報導的同儕評鑑方法[9]：

Michaelsen 法要求學生區分每個隊友的表現；Fink 法將同組隊友的貢獻以 100 分來分配，就以調整每個同學的分數；Koles 法整合定性與定量的評鑑。

分析傳統教學法與「團隊導向學習」的差異是在課堂時間的運用上[5] (圖三)，TBL 在將觀念應用的時間比傳統教學法要多很多。傳統課堂中大部分時間使用在解釋知識觀念，因此並沒有留下許多時間討論，使得學生對於理論應用的經驗不足，相反的，在團隊導向學習法，知識的了解是希望學生在由課前準備，上課時評估他們對主題的瞭解程度，再以小組討論方式找到共同的答案，並運用學到的知識解決實務上問題。文獻中顯示，使用 TBL 的學生比用傳統學習方法的學生，在總成績上表現更好，也較能長時間保留已獲得的知識[10, 11]。



圖三、傳統教學法與團隊導向學習法的差異比較[5]

近年來，另一個與 TBL 部分相通的教學方式 — 反向教學 (Flip Teaching) — 也經常被提起，過去在臺灣大學葉丙成教授的大力提倡，使得「翻轉教室」名聲大燥。其主要觀點是將原來課堂上知識講授的內容與時間，和學生課堂外做作業的內容與時間之順序對調；學生在課堂外事先透過閱讀課本、觀看預錄的教學影片，或是聽網路音訊 (podcasting) 來預習主要的教材內容，但是在課堂上，學生則傳統教學中的作業。因此，學生在課堂上的主要活動，不再是被動地接受教授所給的資訊，而是與教授和其他同學一起運用他們在課前預習的知識，共同解決較深的問題 (作業)。TBL 也應用這種「翻轉教室」的設計再加上團體學習的模式，一方面深化學生的學習，同時也讓學生學習在團隊中與人共事的素養。在團隊導向的學習方式下，學生的個人學習成效與他所屬「團隊」的整體成型、發展、運作成效息息相關[5]。

除了以上頗為受到關注的教學方法外，在化工教學中的問題經常是非常複雜的，其中必須使用數學計算，有時過程十分複雜。如果要計算整個化工程序的問題，不同的單元計算環環相扣，更非筆算所能解決。因此，在計算上需要使用電腦輔助。在本計畫中的 PBL 的題目也是需要使用電腦輔助。目前在台灣化工系大學部必修科目的教學上，卻很少使用電腦輔助計算，因此所能夠提出來的問題不能夠太複雜，如此也跟實際化工廠的情況有很大的差別。

綜合以上，本計畫的目標即在化工的專業必修課程中，改變教學方式，以「問題導向學習」、「團隊導向學習」以及「電腦輔助解題」為主，希望可以提高學生的學習興趣、提升學生的學習成果、培養學生自主學習的能力、刺激學生團隊工作的能力及應用電腦工具的能力。

3. 研究方法(Research Methodology)

本計畫所配合的課程是大一的第一門化工專業課程「質能平衡」，課程的內容是與化學工程師每日工作所需要的計算 (An introduction to the types of calculations made by chemical engineers in their everyday work)，將課程內容導入「問題導向教學」及「團隊導向教學」的教學法，並且引導學生以電腦解題。

試驗的假設為「問題導向教學法」、「團隊導向教學法」及「電腦輔助解題」可以提高學生的學習興趣、提升學生的學習成果、培養學生自主學習的能力、刺激學生團隊工作的能力

及應用電腦工具的能力。修習本課程的同學將以新的教學法進行，以考試評量以及問卷調查來研判同學的學習成果。教學的過程及評量方法寫在「教學暨研究成果」，在此不贅述。

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

(1) 教學過程與成果

此課程為大一必修課程，共有 45 位同學。

- 準備課程影片及教材：

本課程採取翻轉教學，學生需要在新單元前就先觀看的影片，因此要將傳統教學法中課堂上講授知識的部分錄製成影片。由於學生專注聆聽的時間大約是 10~18 分鐘，因此將課堂講述的每段內容，製作成不超過 18 分鐘的單一主題式的片段。課程的影片放在臺灣大學的平台 NTU COOL (<https://cool.ntu.edu.tw/>)，這是一個封閉的系統，可以選擇只給修課學生觀看，學生可以不分時間及次數觀看。

- 準備題目：

在本計畫中，題目可分為兩種，一種是課堂時由個別同學做的題目，這類問題會有特定的答案，而非開放式的問題，趨向於 TBL 所要求的問題。準備問題時，先將挑選出來的課程內容，再區分為更小的單元或子題，做為一次上課的內容。第二種是跨單元的開放性問題，使同學可以將整個學期的內容融會貫通，題目的內容需要利用多個課程中的觀念，而非單一的主題。這種問題是系統性的，比較複雜，需要使用電腦輔助計算，必須由整個團隊一起解決，在學期末才繳交報告。在電腦軟體上，顧及普遍性，使用 EXCEL。

- 上課方式

上課開始，先詢問學生對於所看影片的內容是否有問題，如果有的話，先回答學生的問題。接下來發下題目卷，先帶領同學閱讀題目，確定完全瞭解題意，同學開始解題，允許同學觀看講義或影片，也可以互相討論。老師則巡視同學解題的情況，如果發現同學有問題，適時提醒解題訣竅。收回題目卷後，針對同學不了解的部分，略作講解。結束後再發新的題目卷。

- 設計問卷：

對於同學的學生態度將以問卷進行調查，詢問學生比較新教學法以及傳統教學法對於學習態度、學習成效的影響，以及同儕間的評鑑。

- 評量考試

雖然採用新的教學法，可是教學的成效依然需要採用傳統的考試，以測驗學生的學習成果，與傳統教學法作為比較的基礎。

(2) 教師教學反思

在錄製影片時，由於影片的長度限制，在講解每段影片時更能抓住該單元的重點，對於老師或學生可以專注在單一主題上，而不至於像一般上課時，容易失去重點。影片的錄製總共超過 100 段，所以花了許多時間，有時一個影片錄製了 3-5 次才完成，還蠻辛苦了。不過相對來說，上課的時候就比較輕鬆，不需要一直講課。此外，同學出席率大增，上課沒人打瞌睡、吃東西、滑手機或玩電腦，大家都集中注意力來解題。此外，影片的總時數只有上課時數的二分之一，因此同學可以花更少的時間來聽講解，如果有疑問，也可以重複觀看，直

到了解。

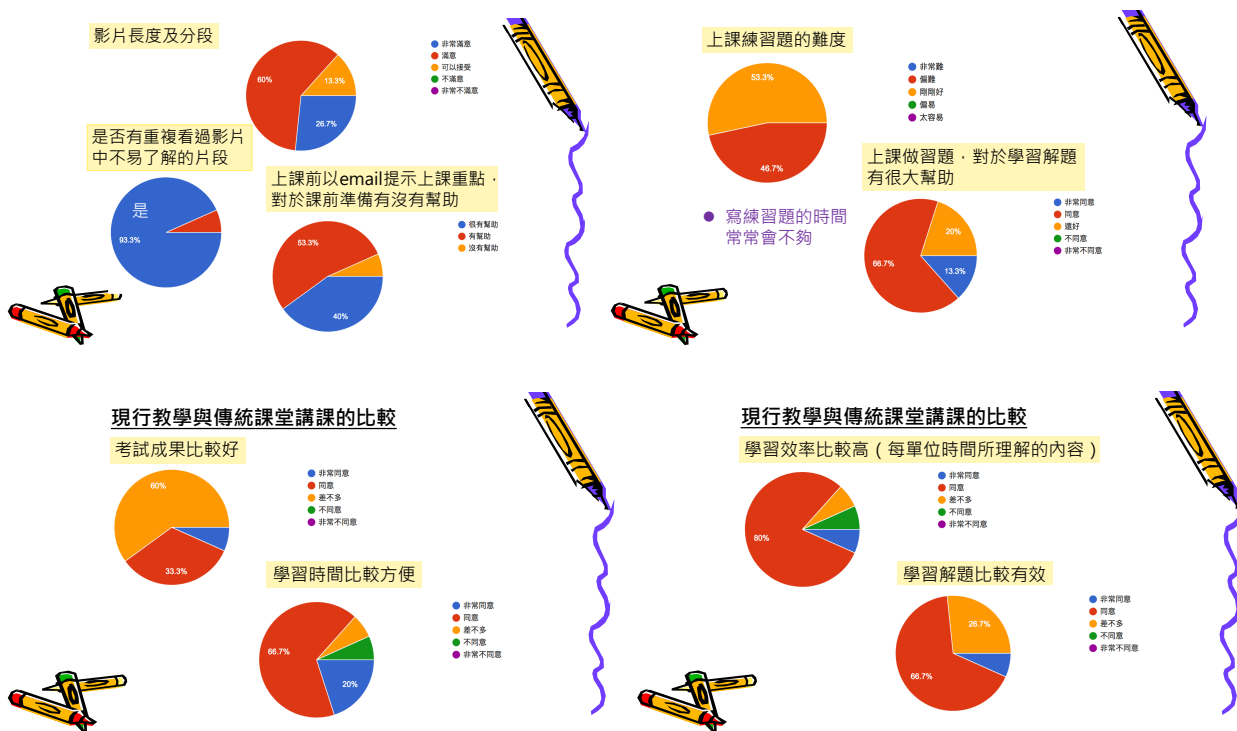
上課的練習題必須小心挑選。以往給作業時，常常就是挑一些課本的題目，未必自行解過。可是上課練習的話，可能會造成上課時的困擾，一節課無法完成一題，因此在題目的挑選上要非常謹慎。為了使上課練習順利，適當的修改題目，分成若干小題，使學生可以循序漸進的解題，以提高其興趣。同時在巡視同學解題的過程中更了解同學解題的困難，例如許多同學對於英文題目的文意不清，造成無法作答，剛開始時必須指導其閱讀題目。總體來說，跟以往的教學方式相比，同學的解題能力明顯提高。

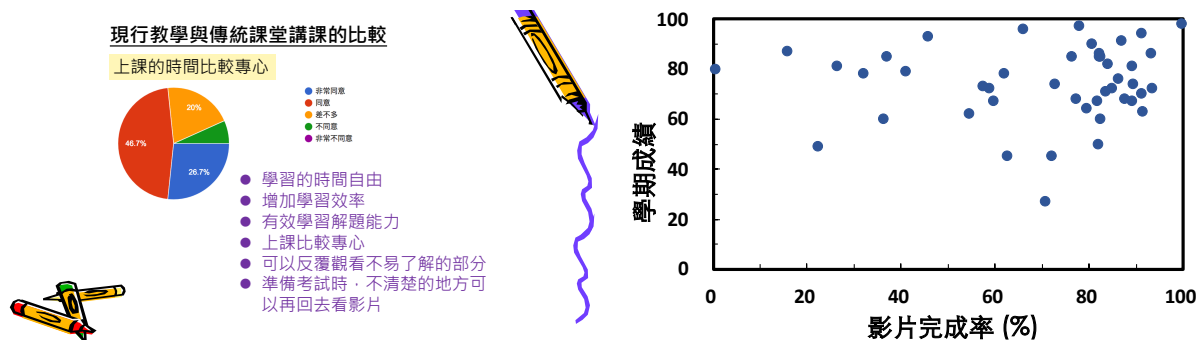
由於同學花在上課跟寫題目的時間縮短，因此可以排出時間來做團體電腦題目。同學經過分組，通過3個小作業的練習，都可以解出學期末的團體作業（詳細結果見附錄一）。不過，部分同學對於使用電腦解題有所排斥，希望透過這學期的練習，可以使其在未來化工系的課程中使用電腦輔助。

由於本課程是大一生，剛從高中畢業，習慣傳統教學方式，許多同學不適應這種上課方式。由於課前看影片以及上課寫練習題，學生必須預習，對部分同學造成壓力，上課會緊張。另外班級人數過多，不易掌握學生練習的情況。學生的程度差距蠻大，有的同學一下就寫完，有些同學寫不出來，練習時間不易掌握。這些問題都待明年來解決。

(3) 學生學習回饋

在學期結束後，利用問卷了解同學對於本課程的回饋。





一般來說，同學的反應不錯，都認為新的方式對於學習有正面的幫助，也願意在系上其他的課程中採用相同的方式。不過觀看影片跟成績之間並沒有相關性，這也是跟原來預期的相同，因為就如同沒有到課堂聽課，不代表考試就比較差。原先是期待可以增加同學的學習效率，看起來有達到預期目標。

二. 參考文獻(References)

1. Albanese MA, Mitchell S. Problem-based learning: a review of literature on its outcomes and implementation issues. Acad Med. 1993;68(1):52-81.
2. Barrows HS, Tamblyn RM. Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education.: Springer Pub. Co., New York, NY.; 1980.
3. Woods DR. Problem-Based Learning for Large Classes in Chemical Engineering. New Direction for Teaching and Learning. 1996;68:91-9.
4. Wiers RW, Van De Wiel MW, Sa HL, Mamede S, Tomaz JB, Schmidt HG. Design of a problem-based curriculum: a general approach and a case study in the domain of public health. Med Teach. 2002;24(1):45-51.
5. 史美瑤. 以學生學習為中心的教學：團隊導向學習法. 評鑑雙月刊. 2012;38.
6. Michaelsen LK, Watson WE, Cragin JP, Fink LD. Team-based learning: a potential solution to the problems of large classes. Exchange. 1982;7:18-33.
7. Michaelsen LK, Knight AB, Fink LD. Team-Based Learning: A Transformative Use of Small Groups in Higher Education: Stylus, Sterling, VA.; 2004.
8. Najdanovic-Visak V. Team-based learning for first year engineering students. Educ Chem Eng. 2017;18:26-34.
9. Michaelsen LK, Sweet M. The essential elements of team-based learning. New Dir Teach Learn. 2008;116:1-99.
10. Tan NC, Kandiah N, Chan YH, Umapathi T, Lee SH, Tan K. A controlled study of team-based learning for undergraduate clinical neurology education. BMC Med Educ. 2011;11:91.
11. McInerney MJ, Fink LD. Team-based learning enhances long-term retention and critical thinking in an undergraduate microbial physiology course. Microbiol Educ. 2003;4:3-12.
12. Duch B. Problems: A Key Factor in PBL <https://www1.udel.edu/pbl/cte/spr96-phys.html> 1996 [cited 2018].

三. 附件(Appendix)

附件一、電腦作業

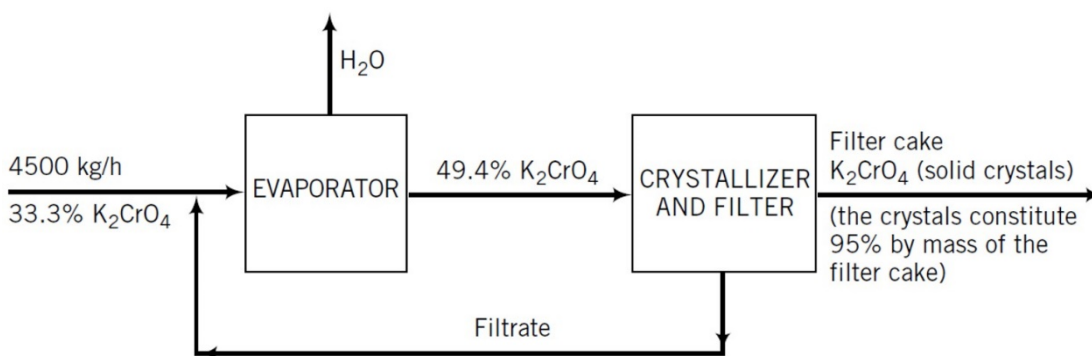
I. 作業題目與說明

● Homework 1:

The flowchart of a steady-state process to recover crystalline potassium chromate (K_2CrO_4) from an aqueous solution of this salt is shown below.

The solution that is one-third K_2CrO_4 by mass is joined by a recycle stream, and the combined stream is fed into an evaporator. The concentrated stream leaving the evaporator contains 49.4% K_2CrO_4 ; this stream is fed into a crystallizer in which it is cooled (causing crystals of K_2CrO_4 to come out of solution) and then filtered. The filter cake consists of K_2CrO_4 crystals and K_2CrO_4 solution; the crystals account for 95% of the total mass of the filter cake. The solution that passes through the filter, also the same composition as the solution in the cake, is the recycle stream.

The solubilities of K_2CrO_4 at 5°C and 50°C are 57.23 and 69.90 g K_2CrO_4 /100 g water, respectively.



You are asked to design a calculator that can calculate and present the rate of evaporation, the rate of production of crystalline K_2CrO_4 , the feed rates that the evaporator and the crystallizer must be designed to handle, and the recycle ratio (mass of recycle)/(mass of fresh feed) for different feed rate and crystallizer temperature, 5 °C and 50 °C.

The assignment should include:

A flow chart with labelling all the streams and compositions.

A table that clearly summarizes the conditions and results, as the following example.

Complete calculation process or code.

Note: the results and flow charts for different feed rate and crystallizer temperature should be directly demonstrated by changing the values in the condition table.

第一份作業為蒸發器和結晶器的物質平衡計算，題目給定進料的流量及組成、產物濾餅及濾液的比例以及藉由溫度來指定飽和溶液之濃度，所求為各單元進出料之流量以及回流比。

在課堂中，學生需要根據題意畫出流程圖並標明物種及流量。但以往用紙筆進行的這個過程，需要改成利用 Excel 中的幾何及箭頭工具來畫出流程圖，並搭配儲存格來標明物種名稱、數值和單位。

圖片
1.
作業
一之
流程
圖

寫出題目的架構後需要利用各物種之質量平衡來進行列式並計算出各物流的數值。這裡要練習的第二個能力為，利用 Excel 解線性聯立方程式組。學生需要將方程式改寫為矩陣的形式，並藉由儲存格連結來整理出係數矩陣。接著利用 Excel 中的矩陣相關函數如：MINVERSE(), MMULT(), 求得方程式的解。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
30	Overall																			
31	Balance									A			B		A ⁻¹				Ans	
32	K	0.333x4500=m ₄ +0.364m ₅				m ₄ +0.364m ₅ =0.333x4500					0	1	0.36398	1500	-0.0328	1	0.65691		m ₂	2951
33	W	0.667x4500=m ₃ +0.636m ₅				m ₃ +0.636m ₅ =0.667x4500					1	0	0.63602	3000	0.9812	0	0.37594		m ₄	1472
34	Ratio	m ₄ =0.95(m ₄ +m ₅)				(1-0.95)m ₄ -0.95m ₅ =0					0	0.05	-0.95	0	0.05164	0	-1.0328		m ₅	77
35																				
36	Crystallizer																			
37	Balance									A			B		A ⁻¹				Ans	
38	K	0.494m ₃ =m ₄ +0.364m ₅ +0.364m ₆				0.494m ₃ -0.364m ₄ =m ₄ +0.364m ₅					0.494	-0.364		1500	4.89171	-2.7994			m ₃	7200
39	W	0.506m ₃ =0.636m ₅ +0.636m ₆				0.506m ₃ -0.636m ₆ =0.636m ₅					0.506	-0.636		49.3	3.89171	-3.7994			m ₆	5650
40																				
41	Mixing point																			
42	Balance									A			B		A ⁻¹				Ans	
43	Mass	4500+m ₆ =m ₁				m ₁ =4500+m ₆					1			10150	1				m ₁	10150
44	K	0.333x4500+0.364m ₆ =x ₁ m ₁				x ₁ =(0.333x4500+0.364m ₆)/m ₁					1			0.35039	1				x ₁	0.350

圖片
2. 作業一之計算過程
最

後，再次利用儲存格連結的方式將結果表示在流程圖上，並將輸入的題目參數和輸出的所求結果整理為表格。由於流程圖和計算矩陣中的數值都是藉由儲存格連結，當調整題目給定的參數時，便可立即算出新的結果。學生必須確保當溶解度隨著溫度上升而提高時，Excel 計算器仍可正確地計算出物流組成，同時學習藉由 Excel 輔助計算化工題目的重要性。

(a)

Condition			Result		
Basis: Feed	4500	kg/h	Rate of evaporation	2951	kg/h
Crystallizer temperature	5	°C	Rate of crystalline	1472	kg/h
	↓		Feed rate of evaporator	10150	kg/h
Solubility	57.23	kg K / 100 kg W	Feed rate of crystallizer	7200	kg/h
Ratio of K ₂ CrO ₄ in the filtrate	0.364	kg K / kg	Recycle ratio	1.26	

(b)

Condition			Result		
Basis: Feed	4500	kg/h	Rate of evaporation	2955	kg/h
Crystallizer temperature	50	°C	Rate of crystalline	1468	kg/h
	↓		Feed rate of evaporator	13418	kg/h
Solubility	69.90	kg K / 100 kg W	Feed rate of crystallizer	10464	kg/h
Ratio of K ₂ CrO ₄ in the filtrate	0.411	kg K / kg	Recycle ratio	1.98	

圖片 3. 作業一之輸入輸出表格，輸入的可變條件為(a) 5 °C (b) 50 °C

● **Homework 2:**

(a)

You are asked to design a calculator that can calculate the molar volume of various gas compounds with given pressure and temperature by using **Soave-Redlich-Kwong equation**.

The interested gas compounds include:

Ammonia

Carbon dioxide

Hydrogen sulfide

Nitrogen

Propane

To test your program, calculate the molar volume of each specie under following conditions:

$T = 25.0^{\circ}\text{C}$, $P = 0.10, 1.0 \text{ atm}$

$T = 150^{\circ}\text{C}$, $P = 0.10, 1.0, 10 \text{ atm}$

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $P = 0.10, 1.0, 10 \text{ atm}$

Hint: For solving the mathematical problem of SRK equation, you may be able to use excel built-in tool: "Data" tab ("資料"索引標籤) → "What if Analysis" ("模擬分析") → "Goal Seek" ("目標搜尋")

(b)

You are asked to design a calculator that can calculate the vapor pressure of various compounds with given temperature by using **Antoine equation**.

The interested compounds include:

Acetone

Chloroform

Ethyl acetate

Methanol

Water

The interested temperature range is 0°C to 50°C .

To test your program, calculate the vapor pressure of each specie for $T = 0.00, 25.0, 50.0^{\circ}\text{C}$.

Note:

Complete two problems with **two separate worksheets in one file**.

Each worksheet should include:

The input and output fields of calculator.

A table which lists the involved constants.

A table which summarizes the numerical results under testing conditions.

All the calculation process or code.

If the results need to be obtained using any tool or add-on, the operation must be clearly noted in the result presentation.

作業二的目標為在 Excel 中建構出自製的狀態方程式計算器。學生需要完成兩個部分，一是利用 SRK 方程式來計算出非理想氣體的莫耳體積，二是利用 Antoine 方程式來計算出飽和蒸汽壓。

首先需要具備的能力為，將資料表中各物種的參數值整理輸入 Excel 工作表，並且讓函數能夠根據指定的物種找到這些對應的參數，來帶入方程式計算所求。

Properties				Antoine constant			
Compound	ω	P_c (atm)	T_c (K)	Compound	A	B	C
Ammonia	0.257	111.3	405.5	Acetone	7.11714	1210.595	229.664
Carbon Dioxide	0.225	72.9	304.2	Chloroform	6.95465	1170.966	226.232
Hydrogen sulfide	0.090	88.9	373.6	Ethyl acetate	7.09808	1238.710	217.0
Nitrogen	0.037	33.5	126.2	Methanol	7.87863	1473.11	230.0
Propane	0.152	42.0	369.9	Water	8.10765	1750.286	235.000

圖片 4. 作業二之參數表格

作業二中還有另一項要練習的能力。在 SRK 方程式中，作為變數的體積是三次方程式，難以用筆紙解出數值，公式解的形式也非常複雜。故可以利用 Excel 內建的“目標搜尋”工具，來進行數值解。將初始值設定為理想氣體體積，計算 SRK 方程式之誤差，接著使用搜尋工具來找到使誤差為零的體積值，即解得方程式之根。

(a)

Result	
V	3.47 L/mol
V _{ideal}	3.47 L/mol
V _{SRK}	3.47 L/mol
Error	0.26

Goalseek for K10=0
by changing K9

目標搜尋

目標儲存格(E): K10

目標值(V): 0

變數儲存格(C): \$K\$9

確定 取消

(b)

Result	
V	3.38 L/mol
V _{ideal}	3.47 L/mol
V _{SRK}	3.38 L/mol
Error	0.00

Goalseek for K10=0
by changing K9

目標搜尋狀態

對儲存格 K10 進行求解，
已求得解答。

目標值: 0
現有值: 0.00

逐步執行(S) 暫停(P)

確定 取消

圖片 5. 作業二之目標搜尋工具求解範例，(a)求解前(b)求解後

學生需要確保能夠利用自製的計算器，在不同的物種、壓力和溫度條件下，皆能快速且正確給出指定物種的計算結果，同時學習利用電腦來進行複雜高次方程式計算的便利性。

(a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	SRK equation	$P = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a\alpha}{\hat{V}(\hat{V} + b)}$												
3														
4														
5	Compound	P	10.00 atm											
6	Ammonia	T	25.0 °C	=	298.15 K									
7														
8		ω	0.257	-										
9		P _c	111.3 atm											
10		T _c	405.5 K											
11		R	0.082 $\frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$											
12														

Result

V 24.25 L/mol

V_{ideal} 2.44 L/mol

V_{SRK} 24.25 L/mol

Error 9.00

Goalseek for K10=0
by changing K9

(b)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Antoine equation	$\log_{10} p^* = A - \frac{B}{T + C}$								
3										
4										
5	Compound	T								
6	Water	0.0 °C								
7										
8		A	8.10765							
9		B	1750.29							
10		C	235.0							

Result

p* 4.6 mm Hg

log p* 0.66

p* 4.6 mm Hg

圖片 6. 作業二之計算器結果呈現

● Homework 3:

You have been assigned to simulate a flash evaporator that separates a liquid feed stream containing benzene and toluene at temperature T_f (°C) into liquid and vapor product streams in equilibrium at temperature T (°C) and pressure P (mm Hg). The compositions of the product streams are related by Raoult's law, and the component vapor pressures are expressed by the Antoine equation.

In the test case, a 40 mole% benzene–60 mole% toluene mixture is fed to the evaporator at $T_f = 120$ °C and a pressure high enough to assure that the feed stream remains in the liquid state. The unit operates at $T = 100$ °C and $P = 800$ mm Hg.

The heat capacities of liquid benzene and toluene have been taken to be 0.138 kJ/(mol·°C) and 0.165 kJ/(mol·°C), respectively, and the vapor heat capacities and heats of vaporization of both species are those given in Appendix B.

Goals

Create a calculator that can calculate and present the following terms:

The flow rates and compositions of the liquid and vapor product streams.

The fractional vaporizations of benzene and toluene.

The specific enthalpies of benzene and toluene liquid at T_f and T and of benzene and toluene vapor at T (all relative to the liquid species at 0°C).

The required rate of heat transferred to the evaporator.

Use the calculator to determine the bubble-point and dew-point under the test condition.

(Hint: Goal Seek tool may help.)

Notes

The **calculator** means that results under different conditions can be directly demonstrated by changing the values of the input conditions.

The assignment should include:

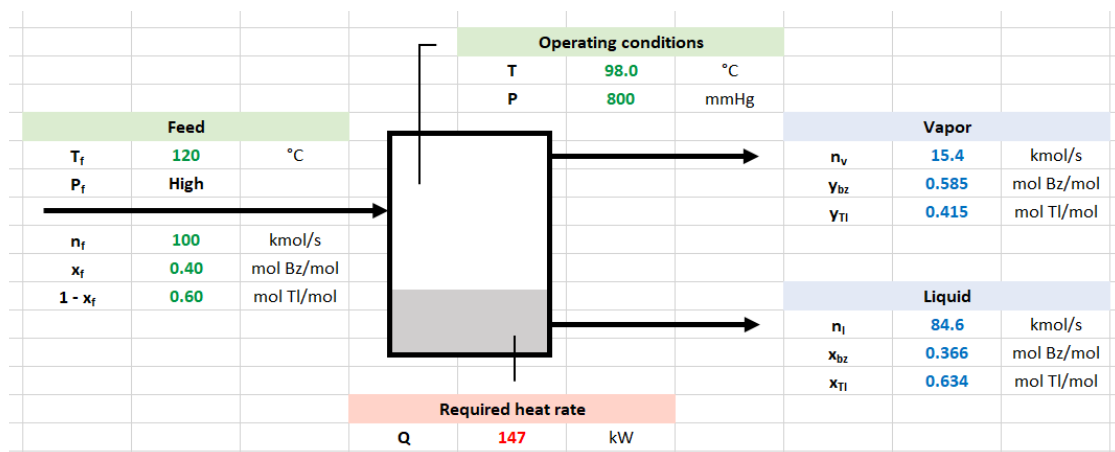
A table that clearly summarizes the input variables and output results.

A flow chart with labelling all the streams and conditions (including compositions).

Complete process or code. (The associated constants should also be displayed.)

If the results need to be obtained using any tool or add-on, the operation must be clearly noted in the result presentation.

在作業三中，學生需要結合前兩次作業的練習，來模擬指定溫壓及進料比例下的兩成分閃蒸器問題——一個更為真實的化工程序。首先需要畫出單元的流程圖，利用作業二中的 Antoine 方程式來計算出溫度條件下的兩成分飽和蒸汽壓，接著利用其配合 Raoult 定律來計算出料的物種比例，最後如同作業一需要將質量平衡的方程式轉換為 Excel 矩陣型式來求解聯立方程組。



圖片 7. 作業三之單元流程圖

(a)

Calculation			Formula and Properties															
Antoine equation			$\log_{10} p^* = A - \frac{B}{T + C}$	Bz	A	B	C											
p^*_{Bz}	1278	mmHg																
p^*_{TI}	523	mmHg																
Raoult's law			Bz	$p^*_{Bz} \cdot x_{Bz} = P \cdot y_{Bz}$	$p^*_{Bz} \cdot x_{Bz} - P \cdot y_{Bz} = 0$		Coeff.	1278	-800	Coeff^{-1}	0.00132432	-0.00132432	Matrix Y	Matrix X				
x_{Bz}	0.366	mol Bz/mol																
y_{Bz}	0.585	mol Bz/mol																
			TI	$p^*_{TI}(1-x_{Bz}) = P(1-y_{Bz})$	$p^*_{TI} \cdot x_{Bz} - P \cdot y_{Bz} = p^*_{TI} - P$		523	-800	0.00086641	-0.00211641	-277	0.585						
Mole balance			Total	$n_v + n_l = n_f$	Coeff.	1	Coeff^{-1}	4.56	100	Matrix Y	Matrix X							
n_v	15.4	mol																
n_l	84.6	mol																
			Bz	$y_{Bz} \cdot n_v + x_{Bz} \cdot n_l = x_f \cdot n_f$	0.585	0.366	2.67	-4.56	40	84.6								

(b)

Enthalpy					$C_p(l)$	$\Delta \hat{H}_{vap}$	Normal T_b	a	b	c	d	$C_p(v) = a + bT + cT^2 + dT^3$	
T_{ref}	0	°C			kJ/mol-K	kJ/mol	°C	-	-	-	-		
				Benzene	0.138	30.77	80.10	7.406E-02	3.295E-04	-2.520E-07	7.757E-11		
				Toulene	0.165	33.47	110.62	9.418E-02	3.800E-04	-2.786E-07	8.033E-11		
	$\hat{H}(l, T_{ref})$	$\hat{H}(l, T_i)$	$\Delta \hat{H}(l, T_i \rightarrow T)$	$\hat{H}(l, T)$	$\Delta \hat{H}(l, T_i \rightarrow T_b)$	$\Delta \hat{H}_{vap}(T_b)$	$\Delta \hat{H}(v, T_b \rightarrow T)$	$\hat{H}(v, T)$					
Benzene	0.0	16.6	-3.04	13.5	-5.51	30.77	1.38	43.2	(kJ/mol)	$\Delta \hat{H}(v) = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = [aT + \frac{b}{2}T^2 + \frac{c}{3}T^3 + \frac{d}{4}T^4] \Big _{T_1}^{T_2}$			
Toulene	0.0	19.8	-3.63	16.2	-1.55	33.47	-1.158	50.6	(kJ/mol)				
	$\hat{H}_{total}(l)$	$\hat{H}_{total}(v)$											
In	1850	-											
Out	1286	711											

圖片 8. 作業三之物流計算過程，(a)質量平衡(b)能量平衡

除了複習之前內容外，作業三中另一個部分為配合課堂進度來利用 Excel 進行能量平衡的計算。學生需要整理各物種的熱容參數輸入工作表，並配合溫度條件用儲存格連結出能量平衡式來計算熱焓變化量。此部分的目標一樣為藉由 Excel 計算平時用紙筆計算會很繁複的

熱焓變化，使學生感受電腦輔助計算的優點。

最後一個部分的問題為找出指定條件下的泡點(bubble point)。學生需要先理解泡點的物理含義，並且運用在作業二中學習的目標搜尋工具，來在建構的模擬計算器中加入找尋泡點的計算功能。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Flash Evaporator										
2	Adjustable variables				Results						
3	Temperature of feed	120	°C	Flow rate of product	Vapor	0.0	kmol/s	y _{Bz}	0.620	mol Bz/mol	
4	Flow rate of feed	100	kmol/s		Liquid	100.0	kmol/s	y _{Tl}	0.380	mol Tl/mol	
5	Molar ratio of benzene in feed	0.4	mol Bz/mol					x _{Bz}	0.400	mol Bz/mol	
6	Operating temperature	96.9	°C		x _{Tl}	0.600	mol Tl/mol				
7	Operating pressure	800	mmHg	Fractional vaporization	Benzene	0.000	mol /mol				
8					Toulene	0.000	mol /mol				
9				Enthalpy	Ĥ(l, T _f)		Ĥ(l, T)	Ĥ(v, T)	relative to liq, 0°C		
10					Benzene	16.6	13.4	43.1	kJ/mol		
11					Toulene	19.8	16.0	50.5			
12				Required heat rate		-356	kW				
13											
14				Bubble-point	96.9	°C	= Goalseek result of C6 for J22 = 0				
15											

目標搜尋狀態 ? X

對儲存格 J22 進行求解，已求得解答。

目標值: 0
現有值: 0.0

逐步執行(S) 暫停(P)

確定 取消

圖片 9. 作業三之輸入輸出表格及泡點計算範例

● Homework 4:

Formaldehyde is produced by decomposing methanol over a silver catalyst:



To provide heat for this endothermic reaction, some oxygen is included in the feed to the reactor, leading to the partial combustion of the hydrogen produced in the methanol decomposition.

The feed to an adiabatic formaldehyde production reactor is obtained by bubbling a stream of air at 1 atm and 44°C through liquid methanol. The air remains same temperature and leaves the vaporizer saturated with methanol. The stream then passes through a heater in which its temperature is raised to 145°C. To avoid deactivating the catalyst, the maximum temperature attained in the reactor must be limited to 600 °C. For this purpose, saturated steam at 145°C is metered into the air–methanol stream, and the combined stream enters the reactor. A fractional methanol conversion of 70.0% is achieved in the reactor, and the product gas contains 5.00 mole% hydrogen. The product gas is cooled to 145°C in a waste heat boiler in which saturated steam at 3.1 bar is generated from liquid water at 30°C. Several absorption and distillation units follow the waste heat boiler, and formaldehyde is ultimately recovered in an aqueous solution containing 37.0 wt% HCHO. The plant is designed to produce 36 metric kilotons of this solution per year, operating 350 days/yr.

You have been assigned to simulate this plant by using computer program. Show the absorption/distillation train as a single unit with the reactor product gas and additional water entering and the formaldehyde solution and a gas stream containing methanol, oxygen, nitrogen, and hydrogen leaving.

Goals

Create a calculator that can calculate and present the following terms:

The required feed rate of the air (kmol/h) and the steam (kg/h).

The formaldehyde yield (kg/h) and the molar flow rate and composition of the product gas leaving the separation units.

The required energy (kW) for methanol vaporization and the transferred energy (kW) to the heater.

The rate (kg/h) at which steam is generated in the waste heat boiler.

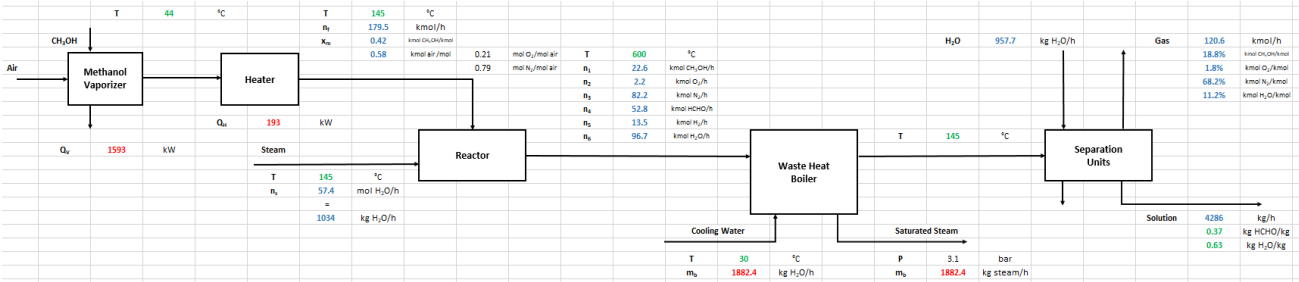
Notes

The **calculator** means that results under different conditions can be directly demonstrated by changing the values of the input conditions.

最後一份作業為前面內容的總複習，利用學習到的 Excel 計算技能來處理涉及多個操作單元的化工製程。學生同樣需要理解題意後在工作表中繪製出程序的流程圖，並標明蒸發器、加熱器、反應器及分離程序等各單元的物種進出料、組成以及溫壓條件，接著結合不同的計算技能來進行求解。

例如在甲醇蒸發器中，需要利用 Antoine 方程式計算器，接著在對單元進行質量平衡，利用矩陣進行解聯立方程式。廢熱鍋爐單元中，質量平衡方程式會同時涉及能量平衡方程式，這會使得題目用紙筆計算的難度增加，在這裡一樣使用 Excel 來快速計算。

最後要對每個單元進行能量平衡計算，作為評估產線耗能的依據。並且同樣將物種進料及環境參數等輸入條件以及計算出的輸出結果整理成表格呈現。學生必須確保儲存格連結運作正常，作為實際產線狀況模擬來調整目標產量或是操作條件時，計算器仍能迅速解出新的結果值。



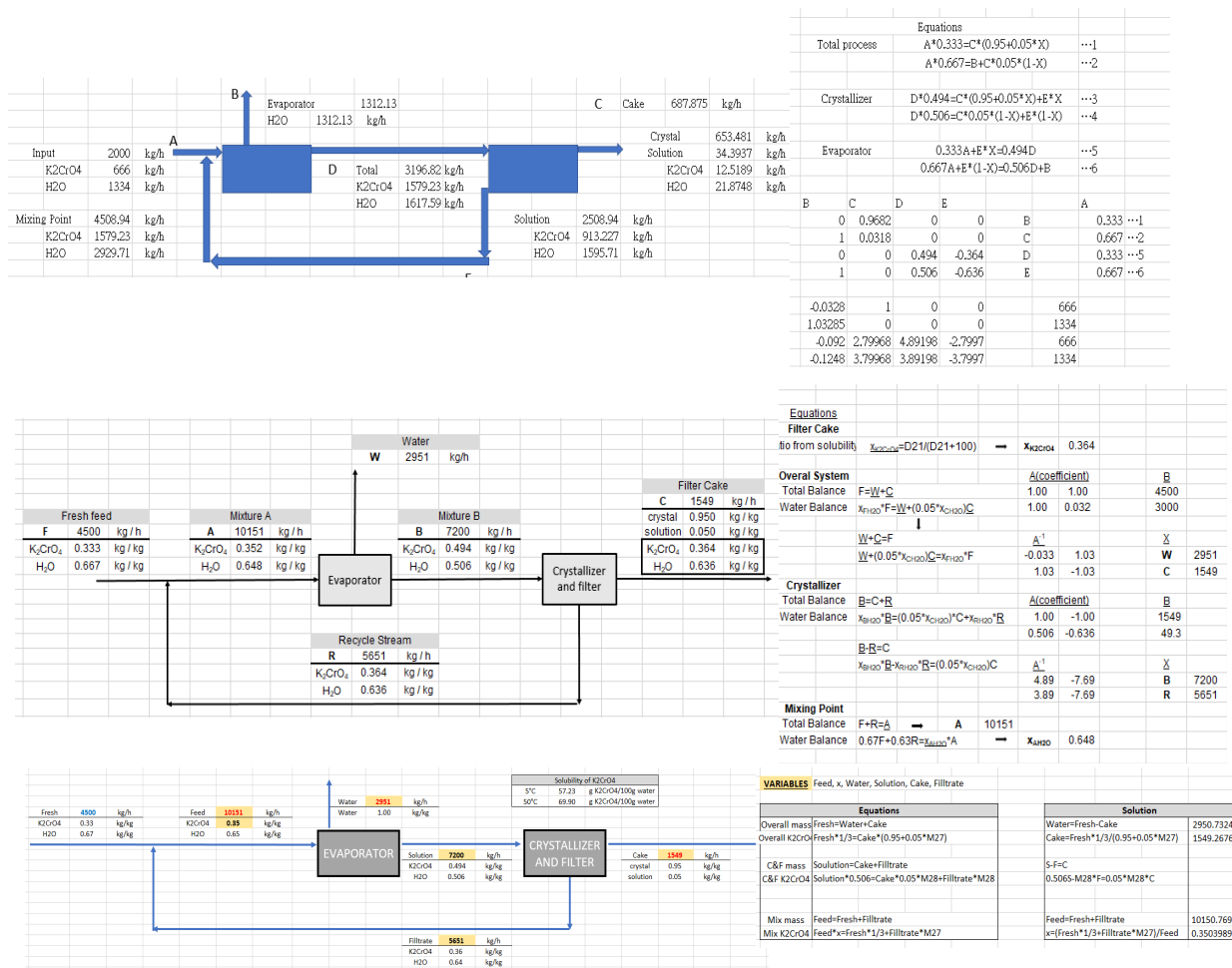
圖片 10. 作業四之流程圖

C	D	E	F	G	H	I	J
Formaldehyde Plant							
Input				Output			
Target yield	36	kilotons/year		Required feed rate of air	104.1	mol air/h	
Operating days	350	days/year		Required feed rate of steam	1034	kg H ₂ O/h	
Vaporizer temperature	44	°C		Formaldehyde yield	1585.7	kg HCHO/h	
Heater temperature	145	°C		Gas product rate	120.6	kmol/h	
Reactor temperature	600	°C			18.8%	kmol CH ₃ OH/kmol	
Methanol conversion	70	%			1.8%	kmol O ₂ /kmol	
H ₂ ratio of product gas	5	mole %			68.2%	kmol N ₂ /kmol	
Cooling water temperature	30	°C			11.2%	kmol H ₂ O/kmol	
Boiler temperature	145	°C		Required power	Vaporizer	1593	kW
Formaldehyde ratio of solution	37	weight %			Heater	193	kW
				Generated steam rate	1882.4	kg steam/h	

圖片 11. 作業四之輸入輸出表格

II. 學生使用情況

● Homework 1:



圖片 12. 作業一之學生作業範例

在作業一中，所有組別的學生都能夠根據題意畫出正確的流程圖及標示物流的流量及組成，並且能夠利用儲存格連結的方式來進行矩陣運算來求解聯立方程式，來獲得所求物流的質量以及回流比。其中唯有少部分組別先行用紙筆運算過度簡化方程式再輸入工作表中，稍微失去利用電腦計算取代繁複計算的目的。其餘可以改進的部分還有有效位數、單位標示、結果呈現的清晰及美觀等。

●

constant	ω	Tc	Pc	a	b	m
NH3	0.25	405.5	111.3	4.24639	0.02588	0.86325
CO2	0.225	304.2	79.2	3.35835	0.02729	0.82631
H2S	0.1	373.6	88.9	4.51279	0.02986	0.83869
N2	0.04	126.2	33.5	1.36649	0.02676	0.5469
C3H8	0.152	369.9	42	9.36381	0.06257	0.71733

R	0.08206	atm*L/mol/K
a	$0.42747*(RT_c)^2/P_c$	
b	$0.08664*(RT_c)/P_c$	
m	$0.48508+1.55171\omega-0.1561\omega^2$	
T _r	T/T _c	
α	$[1+m(1-\sqrt{T_r})]^2$	

T(°C)	P(atm)		
25.0	0.10	1.0	
150	0.10	1.0	10
300	0.10	1.0	10

	$T_g(K)$	$P_c(atm)$	ω	a	b	m	$T(^{\circ}C)$	$P(atm)$	T_r	α	V hat (L/mol)
NH_3	405.5	111.3	0.250	4.253	0.02590	0.863	150.0	10.00	1.04	0.953	3.38
CO_2	304.2	72.9	0.225	3.655	0.0297	0.826	150.0	10.00	1.39	0.725	3.43
H_2S	373.6	88.9	0.100	4.52	0.0299	0.639	150.0	10.00	1.13	0.920	3.38
N_2	126.2	33.5	0.040	1.37	0.0268	0.547	150.0	10.00	3.35	0.298	3.49
C_3H_8	369.9	42.0	0.152	3.98	0.0626	0.717	150.0	10.00	1.14	0.903	3.29

SRK equation :

$$P = \frac{RT}{\hat{V} - b} - \frac{a\alpha}{\hat{V}(\hat{V} + b)}$$

	NH3	CO2	H2S	N2	C3H8
變數(V _{ij})	24.6921	24.616	24.6877	24.505639	24.940932
現有值	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.000617	-0.0004777
目標值	-0.0006	-0.0006	-0.0006	-0.000617	-0.0004777

condition		result(Vm(L/mol))					
T(K)	P(atm)		NH3	CO2	H2S	N2	C3H8
298	0.1		243.377	243.28342	243.37163	243.1512	243.676
298	1		24.6921	24.615962	24.687663	24.50564	24.9409
423	0.1	→	346.497	346.44712	346.50165	346.3834	346.668
423	1		34.8322	34.7861	34.837849	34.72711	34.993
423	10		3.60632	3.5632557	3.611521	3.506791	3.74933
573	0.1		467.515	467.48213	467.52593	467.4463	467.642
573	1		47.0664	47.038595	47.076137	47.00783	47.1755
573	10		4.78598	4.7593054	4.7952393	4.729509	4.88811

計算步驟

- 1.查Table B.1 及 Table 5.3-1, 將已知值填入並將可計算之儲存格輸入公式計算完畢。
- 2.預設 $V_{\text{hat}}=1$ (非0或正負之任意數)。
- 3.在T(°C)那列儲存格輸入條件溫度。
- 4.在P(atm)那列儲存格輸入SRK equation。
- 5.在P(atm)那列儲存格分別使用[資料]→模擬分析→目標搜尋功能：將目標溫度輸入條件壓力，變數儲存格設為該行之V hat 儲存格，按下確定後，即可求出V hat 之值。

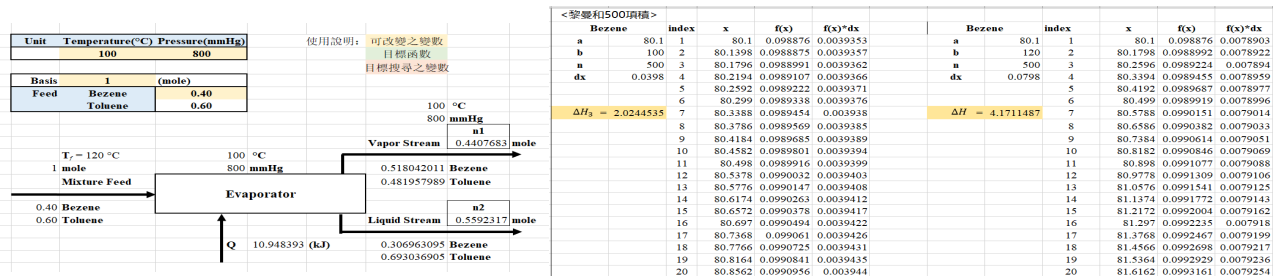
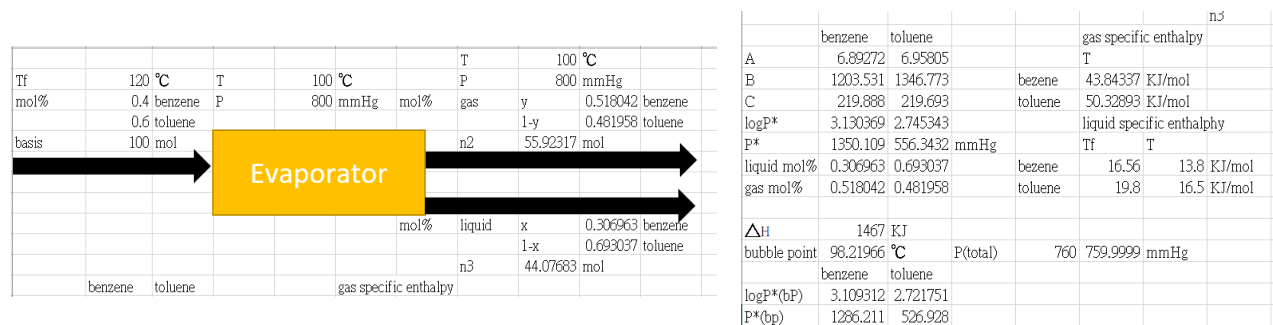
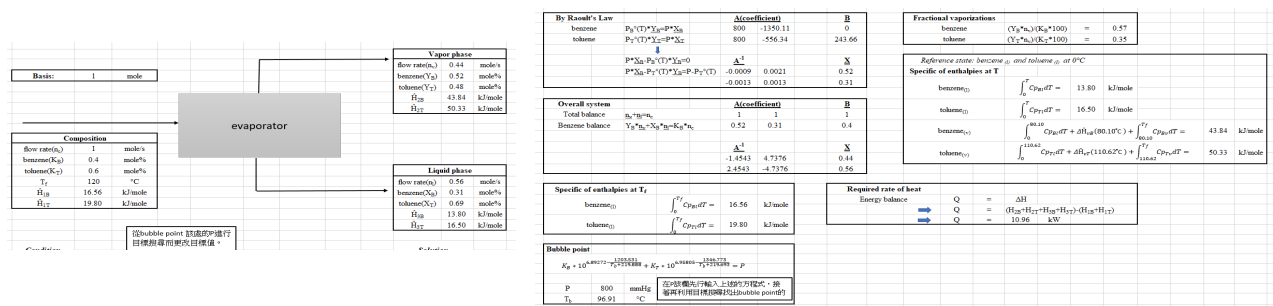
[illegible]

Result(P=0.10atm)	25	150	300			
T(C)						
T(K)	298.15	423.15	573.15			
	P(atm)	P(atm)	P(atm)			
Ammonia	0.10029	243.595	0.10089313	344.107	0.10057	467.2925152
Carbon dioxide	0.09991	244.586	0.10082267	344.106	0.10057	467.3189479
Hydrogen sulfide	0.09989	244.566	0.10081196	344.098	0.10057	467.2895305
Nitrogen	0.09995	245.572	0.10087914	343.971	0.10057	467.3463262
Propane	0.10018	243.661	0.100751068	344.215	0.10057	467.2592483

圖片 13. 作業二之學生作業範例

作業二中，多數組別都能夠正確整理物種的參數並建立表格，接著進行儲存格的連結運算來求得答案。九個組別中有兩個組別選擇不使用目標搜尋，而是將三次方程式的公式解分段輸入工作表，逐步求根，也不失為一種解答方法，且在使用上不須操作插件，更為便利。另外還有兩組學生，未能掌握計算器的意義，並未使用儲存格連結的方式來運算，僅將測試條件下的物理量答案整理為表格，導致其工作表無法計算任意條件下的物理量。故後續的作業中，有再次向學生強調計算器的意義。

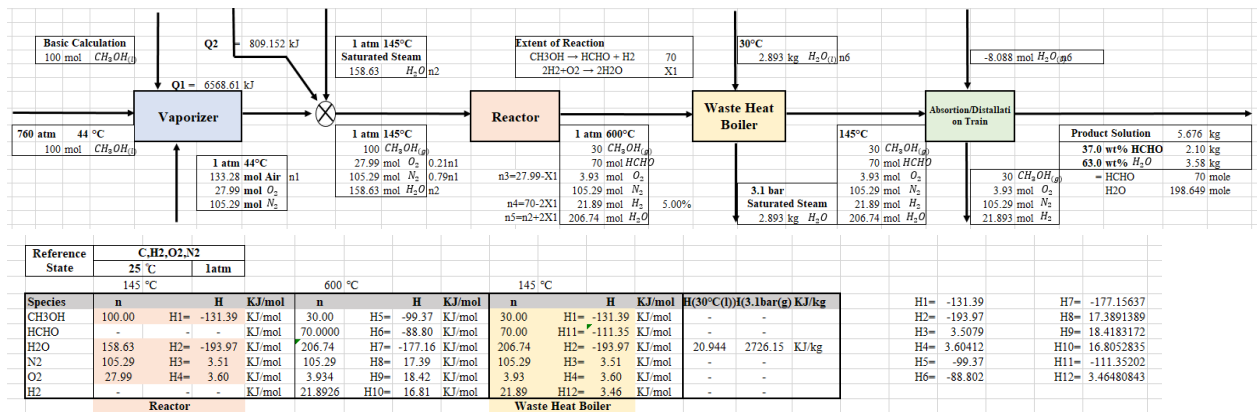
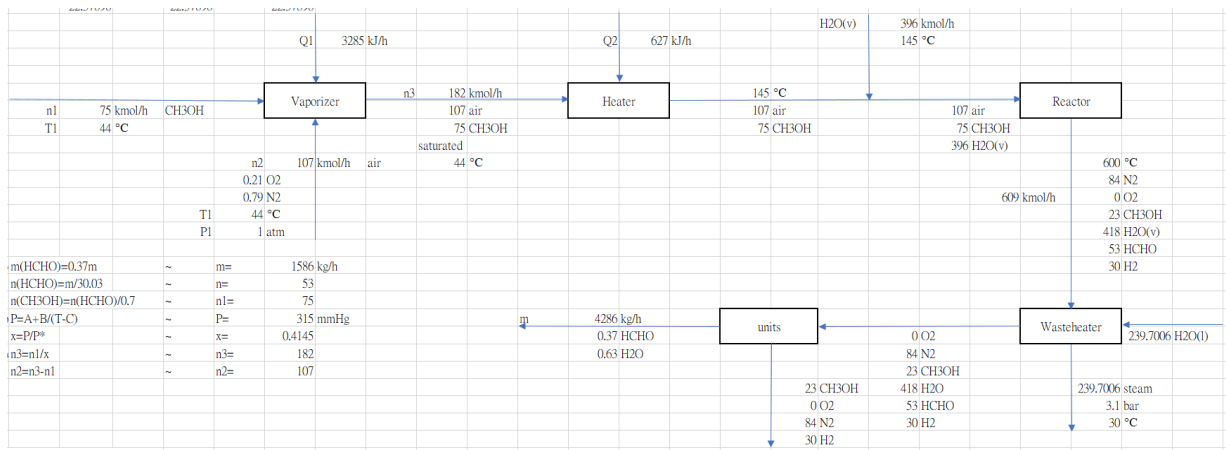
Homework 3:



圖片 14. 作業三之學生作業範例

部分學生在作業三中開始展現對於 Excel 計算化工問題的高度掌握，能夠畫出美觀的流程圖並清楚排版標示各物流，找出各物種之參數並整理成數據庫，接著具有結合不同技巧來精簡地求解複雜問題的能力。對於軟體計算仍較不熟悉的組別，還是會出現過度簡化以及連結技巧使用不足的問題，僅將 Excel 作為結果呈現的工具，而未充分使用運算的功能。特別的是，其中一組學生並未使用反導函數，而是使用黎曼和來求解熱焓變化。雖然版面較為龐大，但對於往後求解難以找出反導函數的方程式時有所幫助，同樣有達到練習數值解的目的。

Homework 4:



圖片 15. 作業四之學生作業範例

在最後一份作業中，多數學生都能夠正確地將涉及多個操作單元的大型化工製程轉譯為 Excel 工作表的圖示及儲存格欄位，也能利用先前的所學來對個別的單元進行蒸氣壓、莫耳比、熱量交換等物理量計算。但由於計算量龐大，物種及參數又多，對軟體掌握度較差的組別容易在輸入函數及連結儲存格時失誤，或是犯下重複計算導致過程更為冗長的錯誤，九個組別中僅四個組別能夠完整無誤地求得整個程序的各項結果。雖然仍有計算犯錯、標示不明確、排版美觀等進步空間，但學生皆能正確地將化工問題藉由 Excel 軟體來呈現，並且將所學的計算技巧運用在解答的過程中。