115 學年(2026-2027)大學部學生程序設計競賽題目

題目：異丙苯製程之高值低碳化設計

1. 前言與背景

工業上的苯酚主要透過異丙苯法生產，於高溫高壓下經烷基化反應生成中間體異丙苯。在此製程的前半段烷基化反應中，異丙苯會與系統中過量的丙烯繼續發生副反應，衍生出二異丙苯（DIPB）異構物家族，包含了鄰位（o-）、間位（m-）與對位（p-）三種異構物。

中國近年透過大型石化基地大量擴產，導致全球產能嚴重過剩，傳統仰賴規模經濟與區域價差的操作模式，在低價市場競爭下已難以為繼。面對此結構性挑戰，台灣石化業必須跳脫大宗低價競爭，從**製程精緻化**、**高值化反應副產物**、以及**產品碳足跡差異化**尋求策略突破，切入高階半導體與特用化學品供應鏈。

一、製程精緻化

中國雖然產能巨大，但產品多數屬於工業級。台灣可利用異丙苯法的既有技術底蘊，透過精餾系統優化，將異丙苯品質提升至超高純度。超高純度異丙苯是生產電子級苯酚的核心源頭，電子級苯酚則可用於半導體封裝模塑料與高頻高速 PCB 板材所需的特用環氧樹脂與酚醛樹脂。台灣業者應將研發與資本支出挪向後段的高級純化設備，以穩定的超高純度品質，擺脫大宗規格低價競爭。

二、高值化反應副產物

必須向毛利更高、進入門檻更高的下游特用化學品延伸，純化副產物 p-DIPB 至 99%以上高純度，作為對苯二酚（hydroquinone）、抗氧化劑、聚合物安定劑、特用化學品、光阻劑、半導體材料中間體。

三、產品碳足跡差異化

在全球歐美大廠強烈要求供應鏈揭露與削減碳足跡的趨勢下，綠色低碳已成為進入國際市場的實質門檻。中國產品雖具備成本與規模優勢，但其大宗製程的碳排強度普遍較高。台灣必須透過低碳原料導入、製程回收優化與熱整合，大幅降低產品碳足跡，以此作為綠色溢價優勢，與中國傳統工業級產品做出關鍵的市場差異化。

2. 設計目標

一、製程精緻化：建立年產 45 萬公噸、純度達 99.9 wt%的超高純度異丙苯製程（產量規模對應下游 30 萬公噸/年之苯酚生產需求）

二、高值化反應副產物：增設純化單元，由異丙苯反應的副產物中分離出 99 wt%以上的高純度 p-DIPB，年產量須達 2,000 公噸。

三、產品碳足跡差異化：計算產品碳足跡並以製程設計方法減少整體碳足跡

3. 設計條件

異丙苯生成反應條件簡述如下：

- 進料 A：純苯，溫度 25°C，壓力 1 atm。

- 進料 B：聚合級丙烯（純度 99.5%，含 0.5%丙烷），溫度 25°C，壓力 1 atm。
- 主反應：異丙苯生成反應
- 副反應：DIPB 生成反應
- 反應器形式：絕熱式固定床反應器。
- 反應條件：操作壓力 25 atm，入口溫度需加熱至 200°C 以上以啟動反應。

異丙苯蒸餾純化包含以下核心區塊：

- 第一精餾塔（De-propanizer）：移除未反應的丙烷與輕組分。
- 第二精餾塔（Benzene Column）：回收過量的苯並循環回反應器再使用。
- 第三精餾塔（Cumene Column）：塔頂產出純度需達 99.9 wt%的異丙苯產品，塔底則為重組分如表一所示； o-DIPB 2.5 wt%、m-DIPB 57.5 wt%、p-DIPB 30 wt%、TIPB 3.5 wt%、殘渣 1.5 wt%（可以四異丙苯（Tetra-isopropylbenzene）作為代表組分）
- 塔底的重組分會進入 DIPB 分離塔。傳統製程中習慣將塔頂切出的 DIPB 股流與過量的循環苯混合，一起送入轉烷化反應器。本設計須修改此傳統配置：該 DIPB 股流不再送往轉烷化反應器，而須增設純化設備，專供生產 99%高純度 p-DIPB，目標產能為 2,000 公噸/年。
- 提純後之高純度 p-DIPB 下游相關應用可參閱表二。由於 p-DIPB 的經濟價值與其純度規範相關，請檢索並建構其純度需求與市場價值之經濟評估基準。

產品碳足跡

- 以產出之超高純度異丙苯與高純度 p-DIPB 作為標的產品，進行產品碳足跡計算，考慮 cradle to gate 邊界條件
- 產品碳足跡計算可考慮範疇一（直接排放）、範疇二（能源間接排放）與範疇三（其他間接排放）之排放作為製程優化指標
- 可透過程序最適化設計與全廠熱整合，增加能源利用效率，以減少因外部電力或蒸汽消耗所衍生之範疇二碳排放。
- 可考慮導入低碳或生質之替代原料以削減源頭碳排，減少範疇三碳排。此策略須兼顧替代原料之經濟可行性。

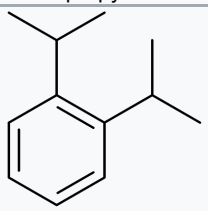
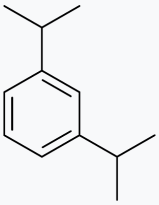
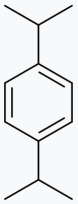
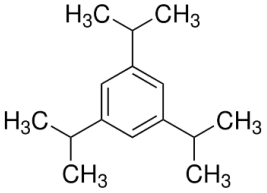
公用流體

電	4.5 NTD/kWh
蒸汽（4 kg/cm^{2}G）	900 NTD/噸
蒸汽（20 kg/cm^{2}G）	1000 NTD/噸
冷卻水(供應 33°C，回水不超過 43°C)	0.1 NTD/kkcal
冰水(供應 7°C，回水不得超過 12°C)	1.0 NTD/kkcal
純水	20 NTD/噸
廢水處理	15 NTD/噸

其他提示

- 所有壓力容器需考慮壓降。
- 熱整合：可利用反應後的熱能或塔頂蒸汽來供應蒸餾塔的再沸器或進料預熱所需熱能。
- 反應動力式考量： 雖然反應器可用轉化率簡化，但建議以速率方程式才能模擬反應器體積並計算成本。

表一：苯酚工廠異丙苯生產單元

	DIPB (Diisopropylbenzenes)			TIPB (Tri-isopropylbenzene)
Systematic name	1,2-Diisopropylbenzene	1,3-Diisopropylbenzene	1,4-Diisopropylbenzene	1,3,5-Triisopropylbenzene
Common name	*o* -Diisopropylbenzene	*m* -Diisopropylbenzene	*p* -Diisopropylbenzene	
Chemical structure				
CAS Number	577-55-9	99-62-7	100-18-5	717-74-8
Chemical formula	$C_{12}H_{18}$			$C_{15}H_{24}$
Molar mass (g/mol)	162.28			204.35
State of matter	Liquid			Liquid
Melting point	−57 °C	−63 °C	−17 °C	-14 ~ -7 °C
Normal Boiling point	205 °C	203 °C	210 °C	232 - 236 °C
Solubility	Very slightly soluble in water	0.072 mg·/L in water (25 ° C)	Practically insoluble in water	Immiscible / Negligible in water

表二：p-DIPB 下游用途

下游產品	p-DIPB 角色
Hydroquinone 對苯二酚	p-DIPB 氧化成 p-DIPB dihydroperoxide，再裂解製 hydroquinone
Stabilizers / polymer stabilizers	p-DIPB 作化學中間體
Synthetic lubricants	中間體
Hydroperoxides	p-DIPB 氧化生成 dihydroperoxide / hydroperoxide 中間體
Solvent / chemical intermediate	p-DIPB 作溶劑或中間體