

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

高級中等學校組 化學科

第三名

050209

「硫」金鑠石—溫度與界面活性劑對反應速率定律式的影響

學校名稱：桃園市立武陵高級中等學校

作者：	指導老師：
高二 夏良樂	張明娟
高二 黃昱瑞	吳德鵬
高二 吳好熙	

關鍵詞：反應速率、濁度、奈米硫

## 摘要

在本研究中，我們改變沉澱反應中鹽酸與硫代硫酸鈉濃度，測量在不同溫度或有無界面活性劑條件下，硫析出所造成濁度隨時間的變化。通過多次測量濁度與時間數據，我們推導出濃度、溫度、界面活性劑，如何影響反應速率定律式。

我們將儀器測得隨時間變化的濁度，也就是硫粒子的生成轉換為速率，再依據反應速率與初始濃度間關係，得到反應速率定律式中的各項數值及阿瑞尼斯方程式中的活化能  $E_a$  與常數  $A$ 。最後我們利用分光光度計得出與濁度計相同的級數，並以粒徑分析儀確認與活化能變化數值相符。

## 壹、前言

### 一、研究動機

在高中化學課程中，反應速率是選修化學第二冊的重要內容之一，主要透過觀察反應現象，進行定性定量分析，以了解影響反應速率的因素。然而，這種分析卻難以深入掌握，反應過程的具體數值與變化規律。因此，我們決定採用定量分析的方式，以硫代硫酸鈉與鹽酸之反應作為研究對象。由於我們無法直接得知反應物濃度減少的狀況，我們為此十分苦惱。此時，腦中突然浮現高一校定必修課程中，曾使用濁度計觀察水質的清潔程度，而硫代硫酸鈉與鹽酸反應過程中會產生硫粒子，剛好具備了觀察濁度變化的條件。因此，我們決定利用濁度計，記錄反應進行過程中濁度的變化，以取得更為精確且可靠的實驗數據。

### 二、文獻探討

文獻七中指出：量測濁度的儀器稱為濁度計，其運作原理源於廷得耳效應。廷得耳效應描述光線通過膠體溶液時，會與溶液中粒子碰撞，使光線散射(Scattering)，因而產生可看見的光線路徑。濁度計即是利用光源照射樣品溶液，並透過光感測元件接收散射的光線，以散射光的強弱判斷樣品濁度高低。

文獻三中指出：硫粒子的大小會受到添加劑（如界面活性劑）因素影響，生成奈米級硫粒子的條件需精細控制，否則容易產生聚集與粗大沉澱。界面活性劑會延緩硫粒子的生成，加入界面活性劑後，會改變反應中粒子聚集方式，使反應速率下降，但生成物更穩定、粒徑更小。我們期望透過這樣的實驗設計，進一步進行數據分析，以求出反應速率定律式，並深入了解反應速率的相關因素。

### 三、研究目的

(一)透過實驗得到速率定律式  $r = k[HCl]^m[Na_2S_2O_3]^n$ ，了解不同溫度，

對速率定律式中  $k$ 、 $m$ 、 $n$  等變數的影響。

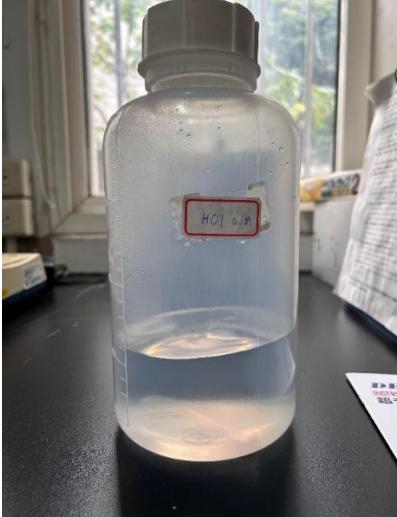
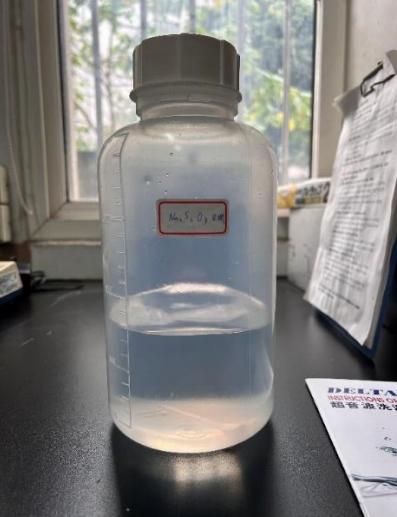
(二)透過實驗了解添加界面活性劑(SDS)，對速率定律式中  $k$ 、 $m$ 、 $n$  等變數的影響。

(三)透過實驗得到阿瑞尼斯方程式  $k = A e^{-\frac{Ea}{RT}}$ ，並計算求得活化能  $Ea$ ，

與前指數因子  $A$  (Pre-exponential factor) 的數值。

## 貳、研究設備及器材

### 一、藥品

鹽酸	硫代硫酸鈉	界面活性劑(SDS)
 (作者自行拍攝)	 (作者自行拍攝)	 (作者自行拍攝)

## 二、器材

濁度計 (EZDO-430)	分光光度計 PUV550C	雷射粒徑分析儀 Otsuka / ELSZ-2000ZS
 (作者自行拍攝)	 (作者自行拍攝)	 (作者自行拍攝)

# 參、研究過程與方法

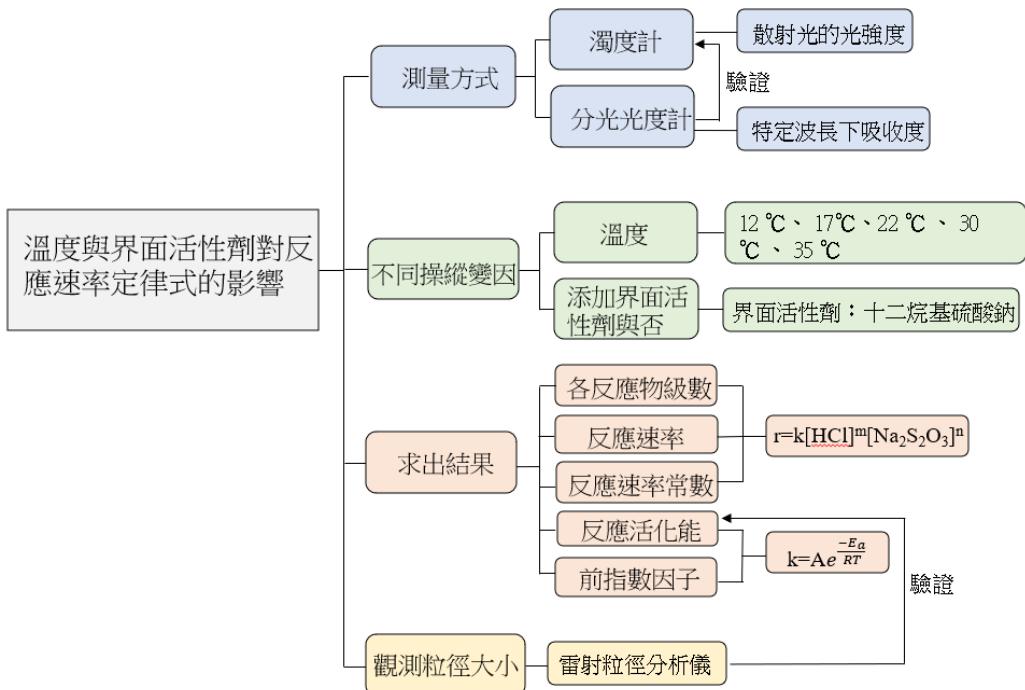


圖 3-1. 實驗設計與流程架構圖(作者自繪)

## 一、實驗設計

$$\text{rate} = k[\text{A}]^m[\text{B}]^n$$

在化學反應速率方程式中，rate 是反應速率，k 是反應數率常數，m、n 為反應級數，  
[A]、[B]是兩反應物的濃度。

若要求得 m 的數值，我們可以先固定 B 物質的濃度，只改變 A 物質的濃度並進行反應，得出多組反應速率後透過數學方法得出 m，而同樣的方法也可以得出 n。

k 值會受到溫度與界面活性劑的影響，因此藉由在不同的溫度下進行反應，我們可以了解溫度對變數的影響。而在相同溫度下在反應中加入界面活性劑，同樣可以得出界面活性劑如何影響反應速率。

## 二、實驗步驟

### (一)定溫改變反應物濃度

我們選用硫代硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$ )和鹽酸( $\text{HCl}\text{(aq)}$ )來進行實驗，因為沉澱反應的反應速率，可以透過測量濁度的變化來推求。硫代硫酸鈉和鹽酸未知的反應速率定律式如下：

$$r = k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$$

為了得到速率定律式中  $\text{HCl}\text{(aq)}$ 濃度的係數 m，我們準備了五組不同濃度，但體積同

為 5mL 的 HCl 水溶液，再分別與 0.1M 5mL 的  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (aq)混和反應，此五組 HCl 水溶液的濃度如下表：

編號	0.1M 鹽酸毫升數+蒸餾水毫升數	稀釋後鹽酸濃度(M)
A1	5 mL + 0 mL	0.1 M
A2	4 mL + 1 mL	0.08 M
A3	3 mL + 2 mL	0.06 M
A4	2 mL + 3 mL	0.04 M
A5	1 mL + 4 mL	0.02 M

反應前先量取各 5mL 的 HCl(aq)與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (aq)裝入小燒杯及濁度測量瓶中，以隔水加熱方式放入較高溫的大燒杯中，等兩個瓶內溫度達到為選定平衡的 22°C 時，將 HCl(aq) 倒入  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (aq) 擦乾外面的測量瓶中，並同時放入濁度計內，開始計時測量並記錄時間與濁度的變化。

註：由於我們使用的濁度計 EZDO-430 的校正樣品最高只到 NTU=800，因此 NTU=800 以上的數據不予紀錄。

為了求得速率定律式中  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  濃度的係數 n 也是用類似的方法。我們先準備五組不同濃度但體積同為 5mL 的  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  水溶液，再分別與 0.1M 5mL 的 HCl(aq)混和。五組  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  水溶液的濃度如下表：

編號	0.1M 硫代硫酸鈉毫升數+蒸餾水毫升數	稀釋後硫代硫酸鈉濃度(M)
B1	5 mL + 0 mL	0.1 M
B2	4 mL + 1 mL	0.08 M
B3	3 mL + 2 mL	0.06 M
B4	2 mL + 3 mL	0.04 M
B5	1 mL + 4 mL	0.02 M

HCl(aq)與Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aq)的溫度，一樣用隔水加熱控制在選定的 22°C，並分別裝入小燒杯和濁度測量瓶中。實驗開始時，我們將小燒杯中的Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aq)倒入擦乾外面的測量瓶中，並同時放入濁度計內，開始計時測量並記錄時間與濁度的變化。



圖 3-2 濁度計外觀  
(作者自行拍攝)



圖 3-3 濁度計測量瓶  
(作者自行拍攝)

## (二)改變反應溫度

我們選定在 12°C、17°C、22°C、30°C、35°C共五組不同溫度下進行實驗，以了解溫度如何影響速率定律式。每組實驗都會和前面敘述定溫改變反應物濃度一樣，先固定Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aq)濃度做五組不同 HCl(aq)濃度 A1 ~ A5，再固定 HCl(aq)濃度做五組不同Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(aq)濃度 B1 ~ B5。

## (三)加入界面活性劑(SDS)

文獻指出，陰離子型界面活性劑 SDS (sodium dodecyl sulfate) 可在硫核表面形成吸附層，提供靜電與空間排斥，延緩粒子聚集並縮小最終粒徑 (文獻三)，為了瞭解界面活性劑如何影響反應速率，我們準備 0.1g 的十二烷基硫酸鈉(SDS)與 50g 的蒸餾水混合(圖 3-4)。我們曾試過取 1g 的十二烷基硫酸鈉加入 50g 的水，但是反應生成硫沉澱的速率太慢，所以最後選擇 0.1g 十二烷基硫酸鈉，配成 0.2%的濃度，於反應前加入 2 滴，後於各種溫度下，測量濁度與時間的變化速率，以用於比較界面活性劑如何影響反應速率。



圖 3-4 攪拌均勻的界面活性劑水溶液  
(作者自行拍攝)

### 三、分析方法

#### (一)以「初期速率法」推導反應級數與速率常數

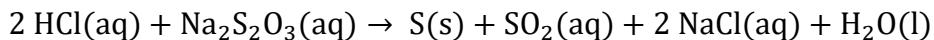
初期速率法是改變某反應物的初濃度，在其他物質濃度維持固定的條件下所進行的試驗，以求得濃度變化對於反應速率變化的影響。以下面反應式為例：



今若 A 物質濃度為  $[A]$ ，B 物質濃度為  $[B]$ ，測得反應速率為  $r$ ，則其反應速率方程式：

$$\text{rate} = k[A]^m[B]^n$$

在我們的實驗中，HCl 與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  的反應式如下：



其中造成濁度變化的是沉澱 S，因此濁度變化速率即為該反應速率，HCl 與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  的反應速率方程式如下：

$$\text{rate} = k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$$

為了求出係數  $m$ ，我們固定鹽酸水溶液濃度，只調整硫代硫酸鈉水溶液濃度，測得在各濃度下濁度隨時間的變化，並繪製出濁度對應時間的關係圖。

由於用濁度計測量出的是濁度與時間的關係，我們先將時間對應濁度數據的後段，呈線性關係的部分進行微分，得到濁度變化量與時間的關係圖，也就是反應速率。

接下來我們將  $\text{rate} = k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$  等號兩邊同取對數  $\log$ ，得：

$$\log \text{rate} = \log k + m \log[\text{HCl}] + n \log[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$$

因固定溫度與硫代硫酸鈉濃度， $k$ 、 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$  為定值，故  $\log k + n \log[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$  也為定值

令  $\log k + n \log[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3] = P$ ，所以  $\log \text{rate} = m \log[\text{HCl}] + P$

若將  $\log \text{rate}$  與  $\log[\text{HCl}]$  的數值繪成圖形，圖形的斜率即為  $m$ 。以同法可求得  $n$  值。

接下來將其中一組濃度的反應速率、 $[\text{HCl}]$ 、 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ ，以及  $m$ 、 $n$ ，代回  $\text{rate} = k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$ ，即可得到  $k$  值。

## (二)觀察溫度對反應速率定律式的影響

要了解溫度如何影響反應速率方程式，我們一樣可以藉由上面的方法，在我們設計的五組溫度下改變濃度來分別求出五組  $m$ 、 $n$ ，並代回數據求出五個溫度的  $k$  值，檢查是哪些變數受到溫度影響。

## (三)觀察添加界面活性劑對反應速率定律式的影響

添加界面活性劑對反應速率的影響一樣可以藉由求出  $m$ 、 $n$ 、 $k$  值來分析。

## (四)代入阿瑞尼斯方程式，求出活化能與阿瑞尼斯常數

已知阿瑞尼斯方程式:  $k = Ae^{-E_a/RT}$

方程式中  $A$  為阿瑞尼斯常數， $E_a$  為活化能。其中等式兩邊同取自然對數得:

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A$$

以  $\ln k$  對應  $1/T$  作圖。斜率乘上  $-R$  即為活化能，而  $e$  的截距次方即為  $A$ 。

## 肆、研究結果與討論

### 一、實驗數據整理

#### (一)無加入界面活性劑反應

以下將以 17°C 的實驗結果為例，說明數據分析後所得之圖表與反應速率表的製作方法，其他溫度之作圖與分析方法皆相同。

(1)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$ 濃度固定為 0.1M，實驗體積 5 mL

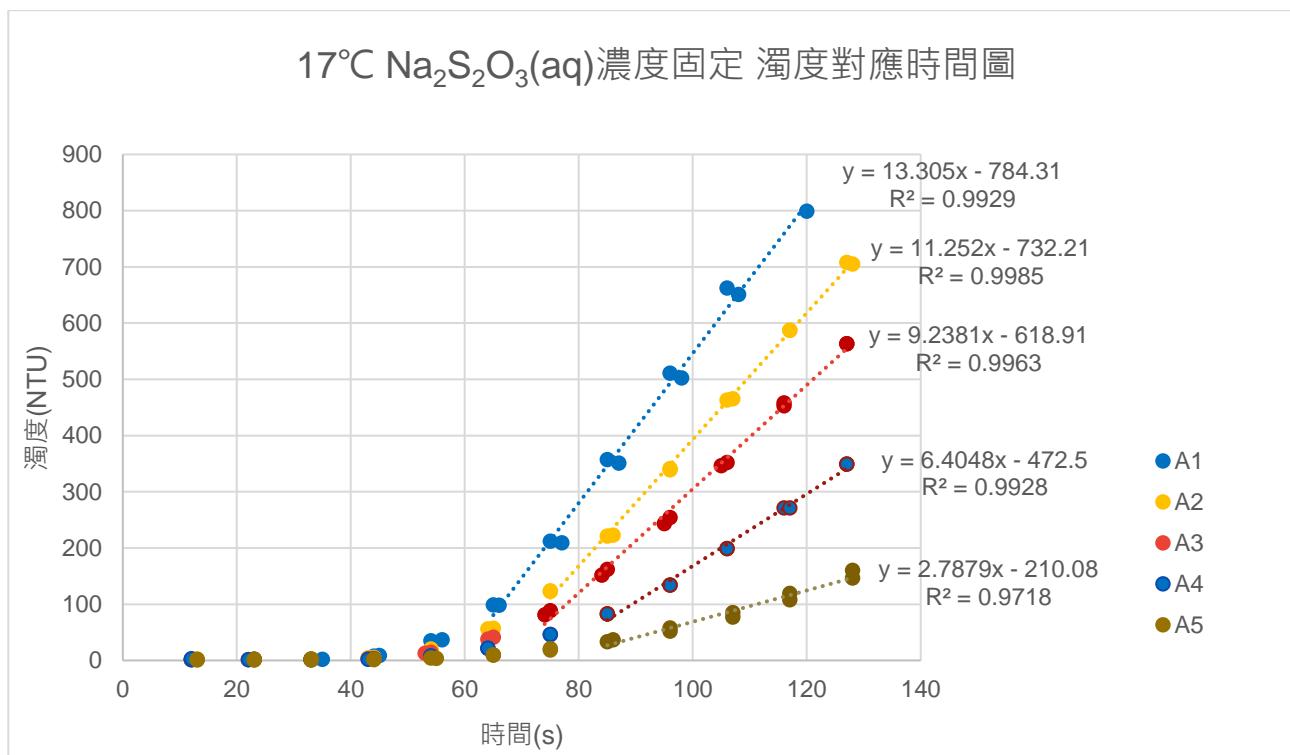


圖 4-1 17°C  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$ 濃度固定 反應測得 濁度對應時間圖  
(作者自繪)

表 4-1  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$ 濃度固定 反應速率表

代號	$\text{HCl}(\text{aq})$ 濃度	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$ 濃度	速率(NTU/s)
A1	0.1M	0.1M	13.31
A2	0.08M	0.1M	11.25
A3	0.06M	0.1M	9.24
A4	0.04M	0.1M	6.40
A5	0.02M	0.1M	2.79

(2) HCl(aq)濃度固定為 0.1M，實驗體積 5 mL

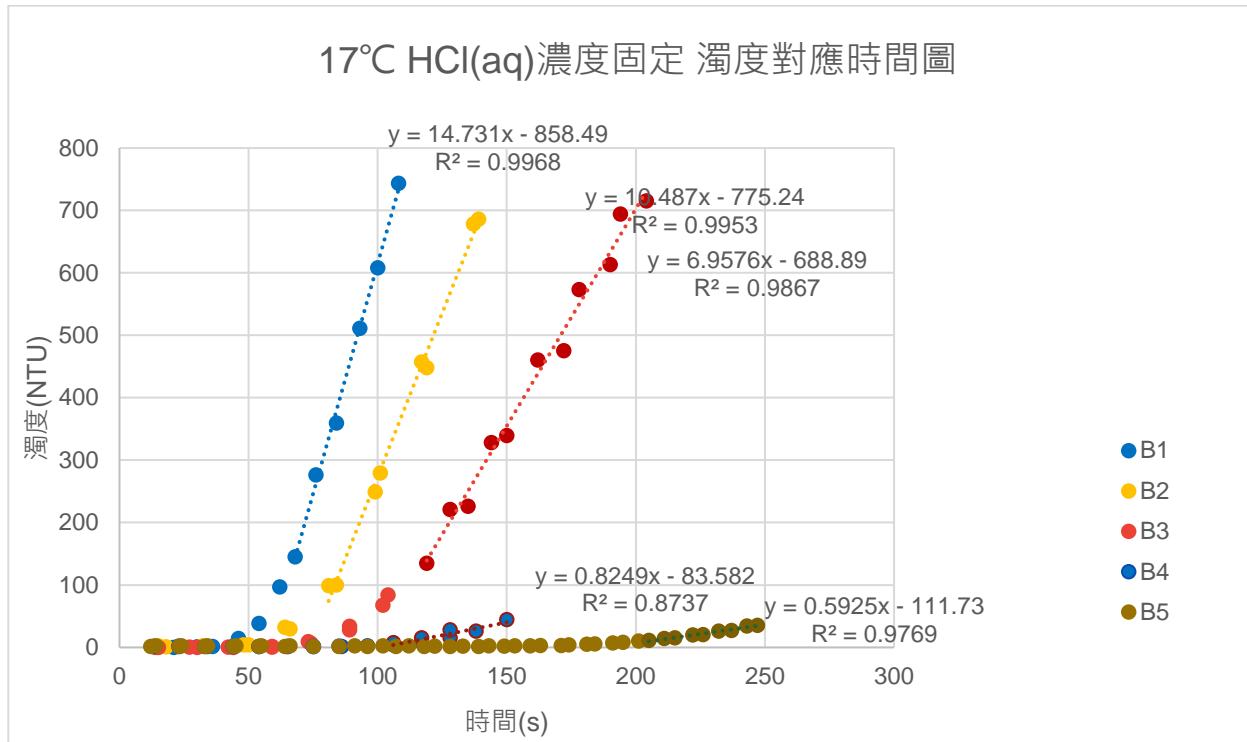


圖 4-2 17°C HCl(aq)濃度固定 濁度對應時間圖  
(作者自繪)

表 4-2 HCl(aq)濃度固定 反應速率表

代號	HCl(aq)濃度	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aq)濃度	速率(NTU/s)
B1	0.1M	0.1M	14.73
B2	0.1M	0.08M	10.49
B3	0.1M	0.06M	6.96
B4	0.1M	0.04M	0.82
B5	0.1M	0.02M	0.59

觀察 17°C 濁度-時間整理圖（圖 4-1、4-2），我們發現兩組 A1 ~ A5 及 B1 ~ B5 的反應速率，明顯隨反應物濃度降低而遞減，代表反應物濃度越高，反應速率越快。再從數據中線性關係區段的趨勢線，找到線性區段的斜率，便可獲得反應速率的數值，如表 4-1、4-2。

## (二)加入界面活性劑

我們滴入兩滴濃度為 0.2 % 的界面活性劑(SDS)，並重複上述作法，得到加入界面活性劑條件下，各溫度的反應速率數值，如表 4-3、表 4-4。

表 4-3  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$ 濃度固定 反應速率表

代號	$\text{HCl(aq)}$ 濃度	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$ 濃度	速率(NTU/s)
A1	0.1M	0.1M	4.86
A2	0.08M	0.1M	3.80
A3	0.06M	0.1M	3.11
A4	0.04M	0.1M	1.65
A5	0.02M	0.1M	0.81

表 4-4  $\text{HCl(aq)}$ 濃度固定 反應速率表

代號	$\text{HCl(aq)}$ 濃度	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$ 濃度	速率(NTU/s)
B1	0.1M	0.1M	9.11
B2	0.1M	0.08M	5.65
B3	0.1M	0.06M	3.20
B4	0.1M	0.04M	2.72
B5	0.1M	0.02M	1.10

## 二、求出 $r = k [HCl]^m [Na_2S_2O_3]^n$ 中的級數 m 和 n

獲得反應速率的數值後，再將反應速率 r，與相對應的反應物濃度( $[HCl]$ 、 $[Na_2S_2O_3]$ )各取對數作圖(圖 4-3、圖 4-4)，由圖形中的直線斜率，即可得級數 m、n 值，詳細處裡如下：

(一) 以 17°C 的實驗結果數據處理為例，說明方法：

(1)  $Na_2S_2O_3(aq)$ 濃度固定為 0.1M，改變  $HCl(aq)$  濃度

下表為 17°C 下各種  $HCl(aq)$ 濃度的反應速率、 $\log(\text{反應速率})$ 與  $\log([HCl])$ 之值：

編號	速率 (NTU/s)	$\log(r)$	$HCl(aq)$ 濃度(M)	$\log [HCl]$
A1	13.31	1.12	0.1	-1
A2	11.25	1.05	0.08	-1.10
A3	9.24	0.97	0.06	-1.22
A4	6.40	0.81	0.04	-1.40
A5	2.79	0.45	0.02	-1.70

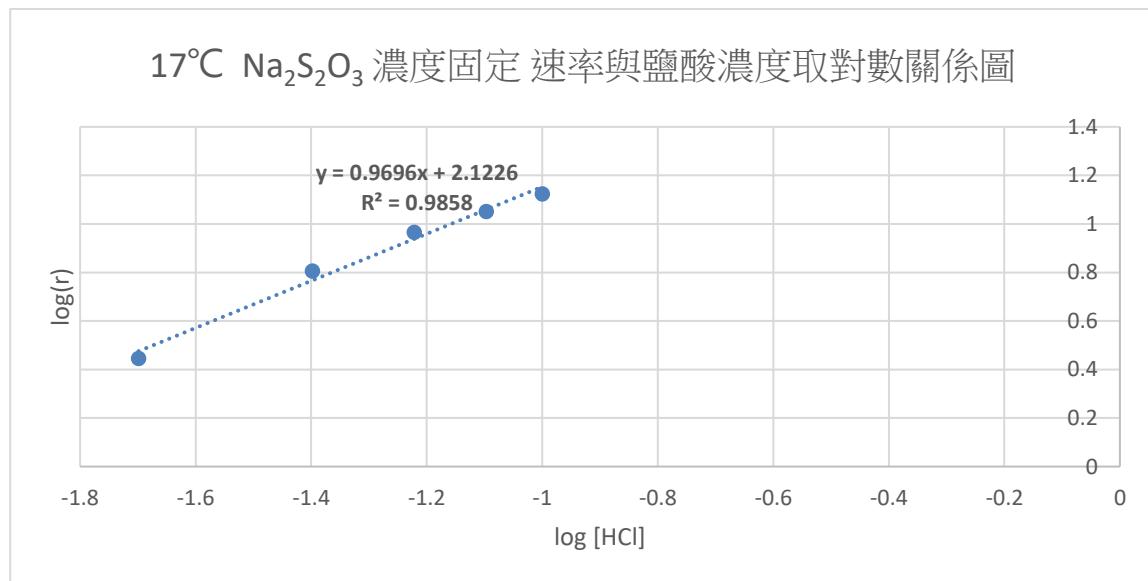


圖 4-3 17°C  $Na_2S_2O_3$  濃度固定 速率與鹽酸濃度取對數關係圖  
(作者自繪)

利用表格的數據來作圖，如圖 4-3，得到的直線斜率，就是速率定律式中  $HCl(aq)$ 的級數 m =0.97 。

(2)  $\text{HCl(aq)}$ 濃度固定為 0.1M，改變  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  濃度

下表為 17°C 下各種  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  濃度的反應速率、 $\log(\text{反應速率})$  與  $\log([\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3])$  之值：

編號	速率(NTU/s)	$\log(r)$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$ 濃度(M)	$\log [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$
B1	14.73	1.17	0.1	-1
B2	10.49	1.02	0.08	-1.10
B3	6.96	0.84	0.06	-1.22
B4	0.82	-0.08	0.04	-1.40
B5	0.59	-0.23	0.02	-1.70

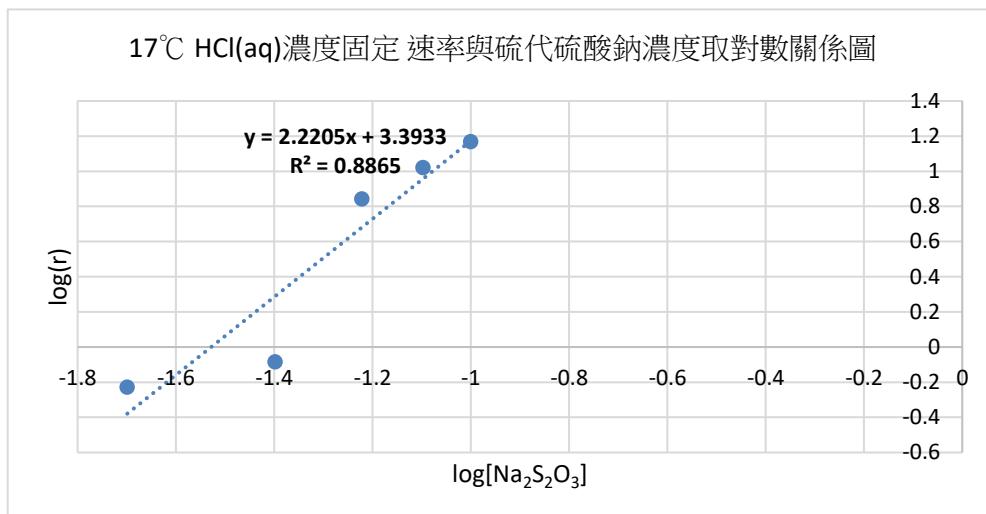


圖 4-4 17°C  $\text{HCl(aq)}$ 濃度固定 速率與硫代硫酸鈉濃度取對數關係圖  
(作者自繪)

利用表格的數據來作圖，如圖 4-4，得到的直線斜率，就是速率定律式中的  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  級數  $m = 2.22$ 。

綜合上述的數據分析結果得到：在 17°C 下反應速率定律式  $r = k[\text{HCl}]^{0.97} [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^{2.22}$ 。

其他溫度的作法如同 17°C，得到不同溫度的反應速率級數 m、n 統整如表 4-5：

表 4-5 未加界面活性劑在不同溫度下的級數

溫度(°C) (未加 SDS)	m (HCl(aq)濃度係數)	n (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aq)濃度係數)
12	0.93	1.44
17	0.97	2.22
22	0.91	1.68
30	0.85	1.81
35	0.80	1.63

加入界面活性劑的數據處理，也如以上同無界面活性劑的方法，  
得到加入界面活性劑後不同溫度的反應速率級數 m、n 統整如表 4-6：

表 4-6 加界面活性劑在不同溫度下的級數

溫度(°C) (加入 SDS)	m (HCl(aq)濃度係數)	n (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (aq)濃度係數)
12	0.89	1.55
17	1.13	2.04
22	0.86	2.27
30	0.73	1.42
35	1.00	1.43

### 三、求出 $r = k [HCl]^m [Na_2S_2O_3]^n$ 中的速率常數 k

我們求 k 值的方法就是，將各溫度求出的 m、n 四捨五入後得到整數值，再代回速率定律式，再將其中一組實驗值的反應速率和濃度，代回反應速率定律式，來求出 k 值。

#### (一)無加界面活性劑

溫度(°C)	k 值
12	9831.2
17	13305
22	14422
30	18730
35	24776

為計算出活化能，上述 k 值均由  $m=1$ 、 $n=2$  代入計算求得，發現 k 值隨溫度上升而上升。

#### (二)有加界面活性劑

溫度(°C)	k 值
12	9874.6
17	4856.3
22	8798.8
30	11386
35	24648

為計算出活化能，上述 k 值均由  $m=1$ 、 $n=2$  代入計算求得，發現 k 值與無加界面活性劑時比較，除高低溫(12、35°C)之外，其餘溫度 k 值均較小。

#### 四、求取阿瑞尼斯方程式中的活化能 Ea 與前指數因子 A

已知阿瑞尼斯方程式為  $k = Ae^{\frac{-Ea}{RT}}$ ，等式兩邊同取自然對數得  $\ln k = \frac{-Ea}{RT} + \ln A$ ，將  $\ln k$  對  $\frac{1}{T}$  作圖，即可得到  $Ea$  與  $A$ 。

##### (一) 無界面活性劑

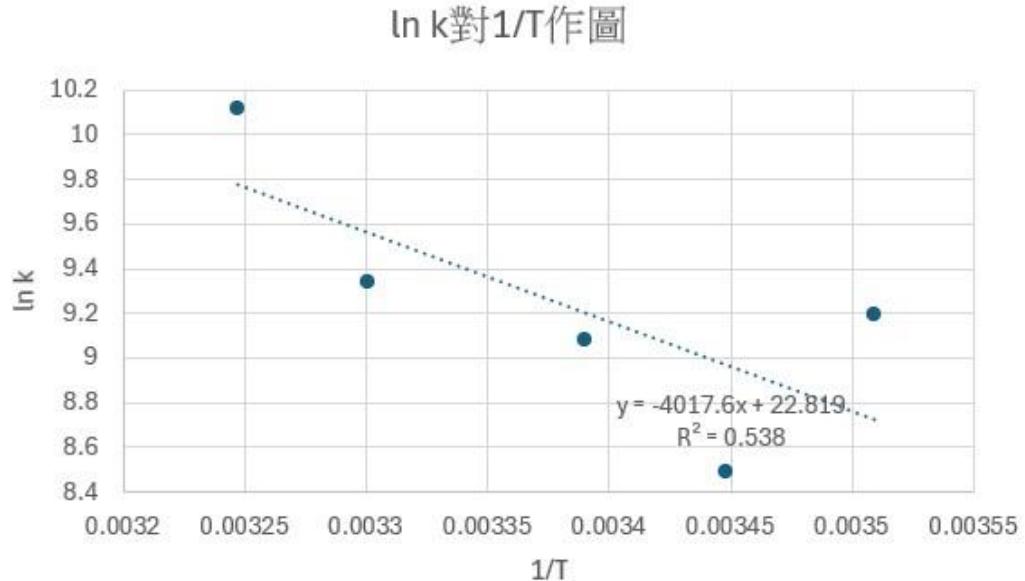


圖 4-5 無界面活性劑下  $\ln k$  對  $1/T$  作圖  
(作者自繪)

中  $1/T$  數值最大的點(最靠右側)，為  $12^\circ\text{C}$  測得的速率常數  $k$ ，會使得圖中斜率的  $R^2$  值過小，並觀察表 4-5、表 4-6， $12^\circ\text{C}$  求得的  $m=0.93$ 、 $n=1.44$ ，特別是  $n$  值較其他溫度的  $n=2$  相去較遠，所以後續作圖刪除  $12^\circ\text{C}$  數值，得到以下的圖 4-6、圖 4-7。

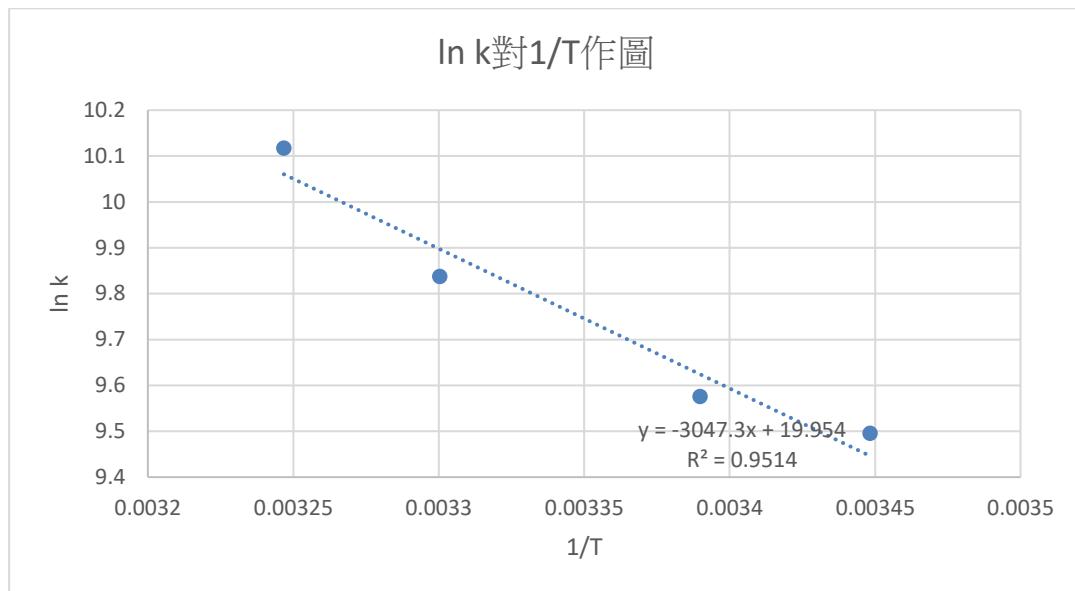


圖 4-6 無界面活性劑下  $\ln k$  對  $1/T$  作圖  
(作者自繪)

由圖 4-6 的斜率與截距，推得無界面活性劑下  $Ea \approx 25.34 \text{ kJ/mol}$ ， $A = 4.6 \times 10^8$

## (二)有界面活性劑(SDS)

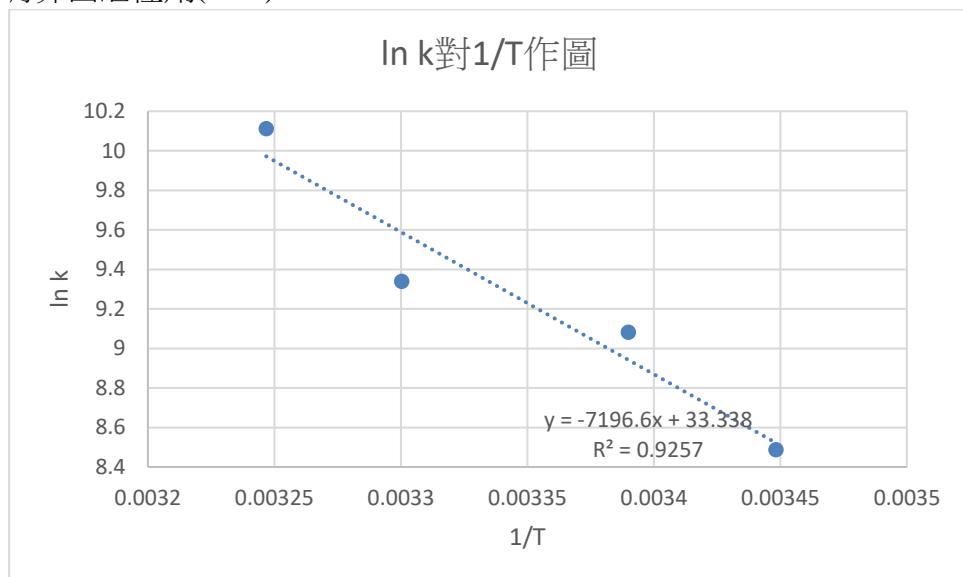


圖 4-7 有界面活性劑下  $\ln k$  對  $1/T$  作圖  
(作者自繪)

由圖 4-7 的斜率與截距，推得有界面活性劑下活化能  $Ea \approx 59.83 \text{ kJ/mol}$ ， $A = 3.0 \times 10^{14}$

## 五、使用分光度計測量並推導反應速率定律式

(一)原理：利用可見光及紫外光之燈管做為光源，經聚焦後通過單色光分光棱鏡，再經過狹縫選擇波長，使光線成為特定波長之光線，而後射入樣品槽中樣品，並透過光感測器測量穿透的光線，藉由樣本及空白水樣間所吸收之光能量差，與標準液之能量吸收值相比較，以推算出樣品的濃度。

### (二)方法：

硫代硫酸鈉和鹽酸未知的反應速率定律式如下：

$$r = k [HCl]^m [Na_2S_2O_3]^n$$

為了得到 HCl 的係數 m，我們先準備五組不同濃度，但相同體積 1mL 的 HCl 水溶液，再分別與 0.1M 1mL 的  $Na_2S_2O_3(aq)$  混和，其中五組 HCl 水溶液的濃度如下表：

編號	0.1M 鹽酸毫升數+蒸餾水毫升數	稀釋後鹽酸濃度(M)
A1	1.00 mL + 0.00 mL	0.1 M
A2	0.80 mL + 0.20 mL	0.08 M
A3	0.60 mL + 0.40 mL	0.06 M
A4	0.40 mL + 0.60 mL	0.04 M
A5	0.20 mL + 0.80 mL	0.02 M

先將各 10.00mL 的  $HCl(aq)$ 、 $Na_2S_2O_3(aq)$  及蒸餾水裝入試樣瓶中，隔水加熱方式放入較高溫的燒杯中，等三個試樣瓶內溫度均為 30°C 時(因為分光光度計測量環境為 30°C)，利用微量吸量管吸取 1.00mL  $HCl(aq)$  置入 1.00mL  $Na_2S_2O_3(aq)$  的分光光度計測量比色皿中，同時開始測量及記錄時間與吸收度的變化。

要得到  $Na_2S_2O_3$  濃度的係數 n，也是使用上述同樣的方法。我們先準備五組分別是 0.02M、0.04M、0.06M、0.08M、0.10M 的  $Na_2S_2O_3$  水溶液 1.00mL，再分別與 0.1M 1.00mL 的  $HCl(aq)$  混合，並測量及記錄時間與吸收度的變化。

(三)硫粒子的吸收光譜圖：

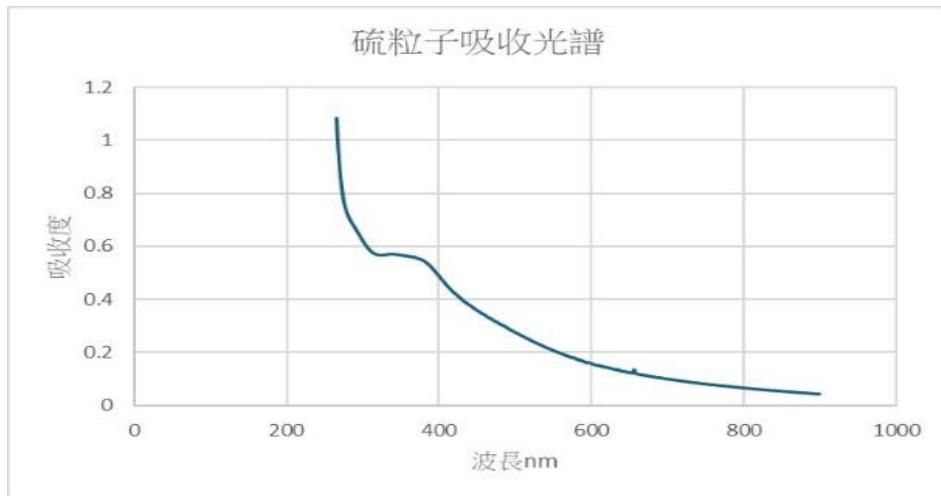


圖 4-8 硫粒子吸收光譜圖  
(由師大化學分析實驗室 UV-Vis 分光光度計測得再由作者自繪)

圖 4-8 為 25°C 下，硫粒子的吸收光譜圖，觀察到約 350 ~ 400nm 有吸收峰，根據參考文獻三中的資料，可以使用波長 400nm 的入射光，來測量硫粒子的吸收度，本實驗也使用相同的波長測量吸收度隨時間的變化。

(四)實驗數據處理結果：

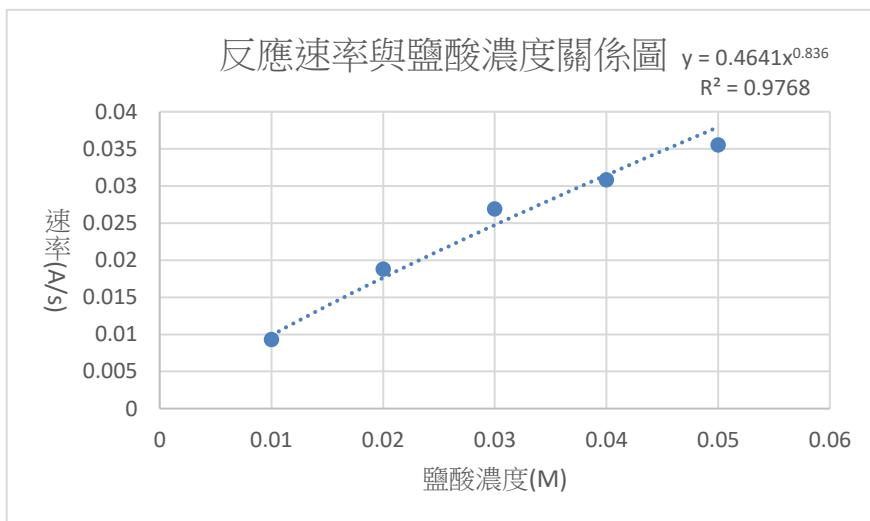


圖 4-9 反應速率與鹽酸濃度關係  
(作者自繪)

由圖 4-9 可得反應速率與鹽酸( $HCl_{(aq)}$ )濃度的級數  $m=0.84$

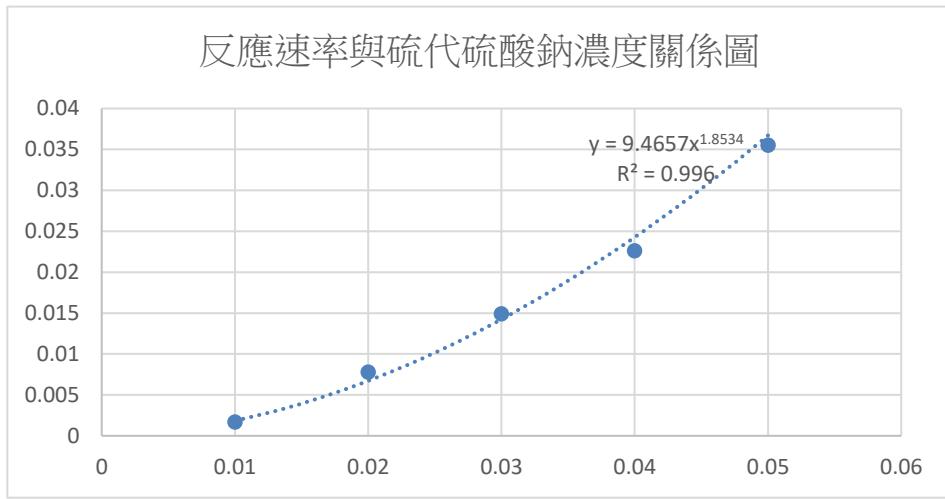


圖 4-10 反應速率與硫代硫酸鈉濃度關係圖  
(作者自繪)

由圖 4-10 可得反應速率與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$  濃度的級數  $n=1.85$

最後實驗數據整理後發現，同樣在 30°C 的情形下，使用分光光度計測量的反應速率定律式，其中的級數部分( $m=0.84$ 、 $n=1.85$ )，與濁度計測量後得到的級數( $m=0.85$ ， $n=1.81$ )結果相符，證實方法可互相驗證。所以使用濁度計測量時，儀器便於攜帶實驗更方便，並且測量時容器體積較大，溶液溫度變化會較小。

## 六、雷射粒徑分析儀( Laser Diffraction Particle Size Analyzer)

為了瞭解在測定濁度的數值時，硫顆粒的粒徑大小隨時間的變化，與界面活性劑的關係，到國立臺灣師範大學化學系，利用雷射粒徑分析儀( Laser Diffraction Particle Size Analyzer)測定，這台儀器是利用光散射原理，測量溶液中粒子的粒徑大小及分佈，得到的硫顆粒粒徑相關數據如下：

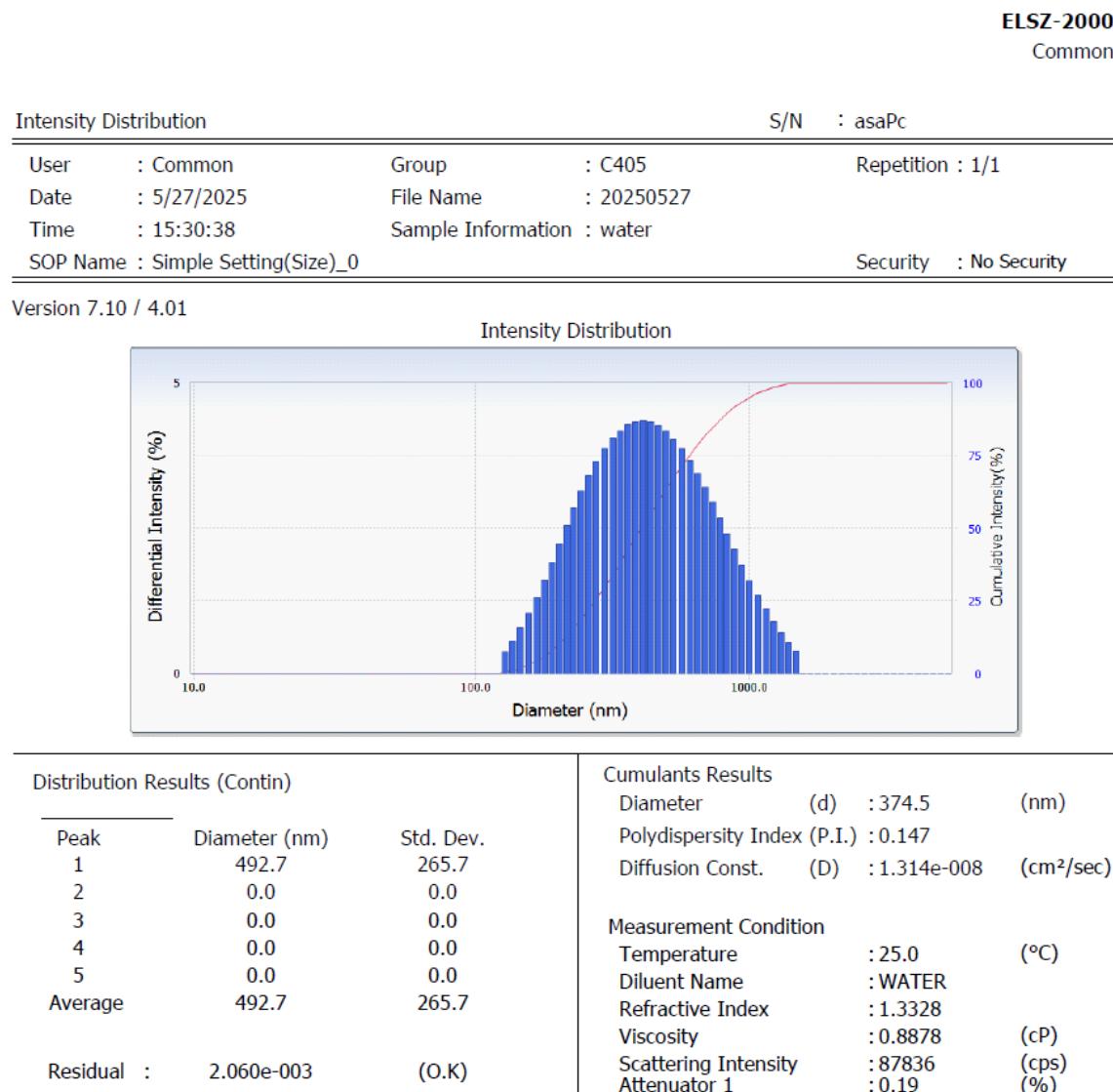


圖 4-11 未加界面活性劑硫粒徑測量數據圖  
(自行使用粒徑分析儀器於師大化學分析實驗室拍攝)

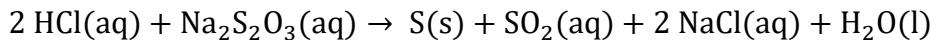
表 4-7 界面活性劑添加與否測得的硫粒徑數據

測量時間與反應條件	未加界面活性劑	加界面活性劑
90 秒	平均粒徑:374.5nm	平均粒徑:286.5nm
300 秒	平均粒徑:702.6nm	平均粒徑:345nm

雷射粒徑分析顯示，25 °C 未加界面活性劑(SDS)之硫粒徑，混合反應後 90s 測得的粒徑 375 nm，到 300 s 時成長至 703 nm，而加有加 SDS 之硫粒徑，反應後 90s 僅由 287 nm 緩升至反應後 300 s 的 345 nm，此趨勢與濁度法 22 °C 時求得的速率常數由  $1.44 \times 10^4$  (NTU<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) 下降至  $0.88 \times 10^4$  (NTU<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) 的結果一致。阿瑞尼斯方程式所求的數據顯示，加入 SDS 會使活化能由 25 kJ mol<sup>-1</sup> 提升到 60 kJ mol<sup>-1</sup>，支持『SDS—硫核吸附層』會帶來的額外能障。綜合粒徑、速率與 Ea，證實 SDS 主要透過電荷排斥，阻礙硫核聚集，沒有改變反應級數，只使速率常數 k 值變小。

## 伍、結論

水溶液中 HCl 與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  的反應方程式如下：



$$\text{反應速率定律式 } r = k [\text{HCl}]^m [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$$

我們測量在不同溫度(12°C、17°C、22°C、30°C、35°C)及界面活性劑(SDS)有無的條件下，硫析出所造成的濁度隨時間的變化，通過多次測量濁度與時間的數據，我們整理出反應速率定律式中 HCl(aq) 與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  的反應級數為 m、n 值，及反應速率常數 k 數值，前指數因子 A 與活化能 Ea 等數據，整理如下表 5-1 與 5-2：

表 5-1 未加界面活性劑(SDS)在不同溫度下的各種數據

溫度及條件 (未加 SDS)	m	n	k	A	Ea
12°C	1	2	9831.2		
17°C	1	2	13305	4.6*10 <sup>8</sup>	25.35kJ/mol
22°C	1	2	14422		
30°C	1	2	18730		
35°C	1	2	24776		

表 5-2 加界面活性劑(SDS)在不同溫度下的各種數據

溫度及條件 (未加 SDS)	m	n	k	A	Ea
12°C	1	2	9874.6		
17°C	1	2	4856.3	3.0*10 <sup>14</sup>	59.83kJ/mol
22°C	1	2	8798.8		
30°C	1	2	11386		
35°C	1	2	24648		

綜合實驗結果整理成以下幾點說明：

一、 $\text{HCl(aq)}$ 與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{(aq)}$ 的反應級數為  $m$  、  $n$  值，在不同溫度下及有／無界面活性劑(SDS)時，大致維持  $m=1$  、  $n=2$ ，可以推論反應機構在  $17^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$  時應相同。

二、速率常數  $k$  值，隨溫度上升而遞增，也符合反應機構在  $17^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$  時應相同的推論。

三、加入界面活性劑 SDS，使  $k$  值在中溫區段( $17^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ )顯著下降，例如在  $22^\circ\text{C}$  時加入 SDS 使  $k$  由  $1.44 \times 10^4 \rightarrow 0.88 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $Ea$  同步由  $25 \text{ kJ mol}^{-1}$  增至約  $60 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，搭配粒徑由  $375 \text{ nm}$  降至  $287 \text{ nm}$  的結果，可推論 SDS 於硫核表面形成陰離子吸附層，增加表面能障，抑制聚集，從而拉長成長期，顯示反應機構未變，而反應速率變小。

四、比較  $k$  值可見：在中溫  $17 - 30^\circ\text{C}$  區段，添加 SDS 後  $k$  值大幅下滑（如  $17^\circ\text{C}$  由  $1.33 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$  降至  $4.86 \times 10^3 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； $22^\circ\text{C}$  由  $1.44 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$  降至  $8.80 \times 10^3 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ），但於極低  $12^\circ\text{C}$  及極高  $35^\circ\text{C}$  兩端則近乎無差異。

五、關於高低溫的  $k$  值，幾乎不受有／無界面活性劑(SDS)影響的推論：(1)  $17 \sim 30^\circ\text{C}$  時 SDS 陰離子可在硫核表面形成穩定吸附層，新增表面能障，使  $Ea$  由  $25 \rightarrow 60 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，因而顯著降低  $k$  值；(2)  $35^\circ\text{C}$  時熱能足以克服或削弱該吸附屏障，抑速效果被「溫度加速」抵消；(3)  $12^\circ\text{C}$  時整體碰撞頻率已是速率瓶頸，SDS 再增能障的相對效應不顯著；(4)低溫  $12^\circ\text{C}$  時溶解度不足，可用單體量低。當界面活性劑濃度低於 CMC 時，分子主要以單分子分散在水相中，無法聚集形成微胞，所以  $k$  值不受影響。

備註: CMC (Critical Micelle Concentration，臨界微胞濃度)，指的是界面活性劑在溶液中由「單分子狀態」轉變為「自發聚集形成微胞 (micelle)」時的臨界濃度。

## 陸、未來展望

一、本研究界面活性劑，粒徑結果已顯示 SDS 可穩定在 ~300 nm 以內，後續對奈米硫尺寸控制的影響，以界面活性劑的不同種類，來控制平均粒徑 < 300 nm 的條件，未來可延伸至硫陰極預製或農業殺菌劑。

二、未來的應用方面：

- (1) 在 Li-S 電池陰極前驅物合成中，測試 <300 nm S 顆粒對電池容量的影響。
- (2) 評估作為農用懸浮式殺菌劑時，SDS-包覆奈米硫的分散穩定度。以上將基礎動力數據轉化為電化學與農業化學應用。

“『硫』金鑠石 — 在最合適的溫度，讓一顆奈米硫慢下來，也讓永續應用快一步。”

## 柒、參考文獻

一、 碘酸鹽型碘鐘反應之動力學的定量研究

<Https://Twsf.Ntsec.Gov.Tw/Activity/Race-1/51/Pdf/040203.Pdf>

二、 臺灣化學教育

<Https://Chemed.Chemistry.Org.Tw/?P=24943>

三、 界面活性劑對硫奈米微粒形成機制的影響。臺北市立第一女子高級中學。李祐慈。臺灣 2002 年國際科學展覽會化學科第一名

四、 阿瑞尼斯方程式

<Https://Zh.Wikipedia.Org/Zhtw/%E9%98%BF%E4%BC%A6%E5%B0%BC%E4%B9%8C%E6%96%AF%E6%96%B9%E7%A8%8B>

五、 碘鐘交響曲-反應速率與反應級數

<https://teaching.ch.ntu.edu.tw/gclab/wp-content/uploads/manual-%E7%A2%98%E9%90%98%E5%AF%A6%E9%A9%97%EF%BC%8D%E7%A2%98%E9%90%98%E4%BA%A4%E9%9F%BF%E6%9B%B2.pdf>

六、 台大開放式課程第十五章化學動力學

[https://ocw.aca.ntu.edu.tw/uploads/course\\_item\\_file/file/12542/ch15.pdf](https://ocw.aca.ntu.edu.tw/uploads/course_item_file/file/12542/ch15.pdf)

七、 吳尚容. (2010). 自製濁度計量測三種微藻濃度變化之研究 [碩士論文, 國立臺灣大學]. 臺灣大學機構典藏. <https://tdr.lib.ntu.edu.tw/bitstream/123456789/10616/1/ntu-99-1.pdf>

八、 Spectrophotometry. (2025, February 19). In *Wikipedia*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrophotometry>

## 【評語】050209

利用硫析出所造成濁度隨時間的變化，推導濃度、溫度、界面活性劑如何影響鹽酸與硫代硫酸鈉反應速率定律式。改變沉澱反應中鹽酸與硫代硫酸鈉濃度，測量在不同溫度或有無界面活性劑條件下，將儀器測得隨時間變化的濁度轉換為速率，再依據反應速率與初始濃度間關係，得到反應速率定律式中的各項參數數值及活化能等。實驗有趣且符合高中生程度，值得鼓勵。

以下問題建議可再思考：

1. 這是硫代硫酸鈉的自身氧化還原反應，是否知道速率決定步驟？
2. HCl 所扮演的角色？
3. SDS 界面活性劑是否在不同溫度產生懸浮粒影響濁度測量？或可加控制實驗組以對照比較。
4. 所量測的反應速率非初始速率，與初始濃度的關係可能導致反應級數的誤差。

作品海報

# 「硫」金鑽石—溫度與界面活性劑 對反應速率的影響

# 壹、研究動機

反應速率在高中課程中是十分重要的一環，且課程多以定性分析討論反應速率的影響因素。然而，定性分析往往無法深入掌握反應過程的具體數值與變化規律。因此，我們決定以定量分析的方式設計實驗，以硫代硫酸鈉與鹽酸之反應作為研究對象。硫代硫酸鈉與鹽酸反應過程中會產生硫粒子，具備了觀察濁度變化的條件。因此，我們利用濁度計記錄反應進行過程中濁度的變化，以取得更為精確的實驗數據。

## 貳、文獻探討

(一) 硫粒子的大小會受到添加劑(如界面活性劑)因素影響，生成奈米級硫粒子的條件需精細控制，否則容易產生聚集粗大沉澱。界面活性劑會延緩硫粒子的生成，加入界面活性劑後，會改變反應中粒子聚集方式，使反應速率下降，但生成物更穩定、粒徑更小。(文獻三)

(二) 濁度計：其運作原理源於廷得耳效應。廷得耳效應描述光線通過膠體溶液時，會與溶液中粒子碰撞，使光線散射，因而產生可看見的光線路徑。濁度計即是利用光源照射樣品溶液，並透過光感測元件接收散射的光線，以散射光的強弱判斷樣品濁度高低。(文獻七)

(三) 分光光度計：利用可見光及紫外光燈管做為光源，經聚焦後通過單色光分光稜鏡，再經狹縫選擇波長，使光線成為特定波長之光線，而後射入樣品槽中樣品，並透過光感測器測量穿透的光線，藉由樣本及空白水樣間所吸收之光能量差，與標準液之能量吸收值相比較，以計算出樣品的濁度。(文獻八)

## 參、研究目的

- 一、得到 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 與HCl的級數— $r=k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$ 中的m與n
- 二、了解溫度變化對 $r=k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$ 中變數的影響
- 三、了解界面活性劑對 $r=k[\text{HCl}]^m[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]^n$ 中變數的影響
- 四、計算反應活化能與阿瑞尼斯方程式的A值

## 肆、研究設備與器材

一、藥品：

鹽酸(HCl)

硫代硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )

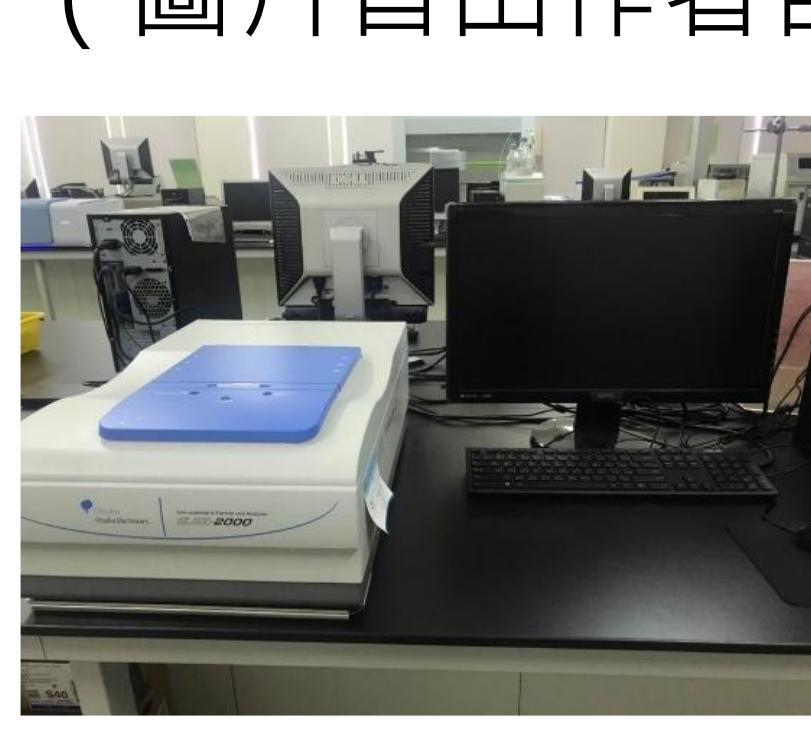
界面活性劑(十二烷基硫酸鈉)(SDS)

二、器材：

濁度計(EZDO TUB-430)(圖一)

分光光度計(PUV550C)(圖二)

雷射粒徑分析儀(Otsuka / ELSZ-2000ZS)(圖三)



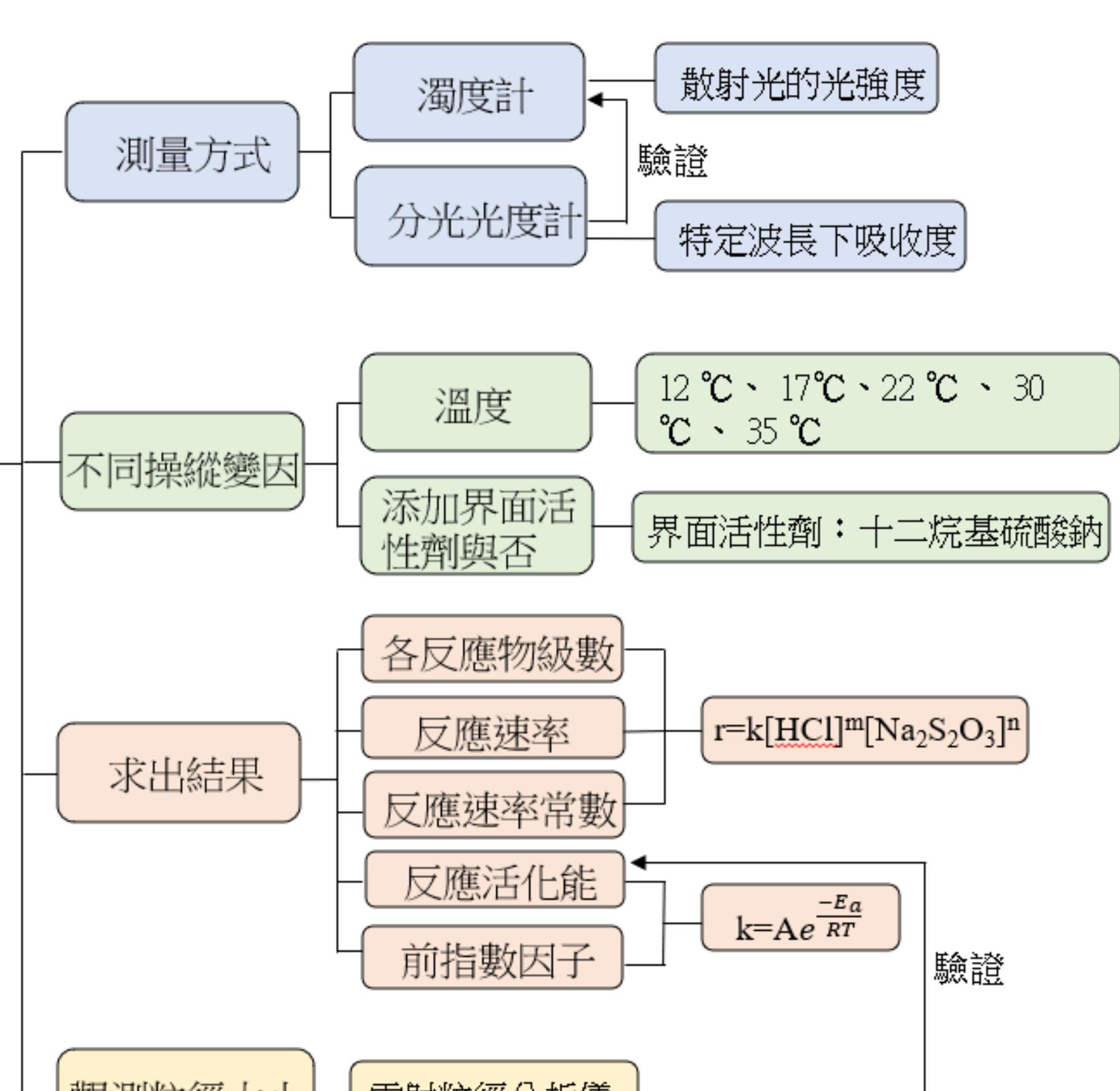
(圖片皆由作者自行拍攝)

## 伍、研究過程與方法

編號	0.1M鹽酸毫升數 +蒸餾水毫升數	稀釋後鹽酸濃度 (M)
A1	5 ml + 0 ml	0.1 M
A2	4 ml + 1 ml	0.08 M
A3	3 ml + 2 ml	0.06 M
A4	2 ml + 3 ml	0.04 M
A5	1 ml + 4 ml	0.02 M

編號	0.1M硫代硫酸鈉 毫升數+蒸餾水毫 升數	稀釋後硫代硫酸 鈉濃度(M)
B1	5 ml + 0 ml	0.1 M
B2	4 ml + 1 ml	0.08 M
B3	3 ml + 2 ml	0.06 M
B4	2 ml + 3 ml	0.04 M
B5	1 ml + 4 ml	0.02 M

溫度與界面活性劑對反應速率定律式的影響



一、實驗原理： $2 \text{HCl}(\text{aq}) + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{S(s)} + \text{SO}_2(\text{aq}) + 2 \text{NaCl}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$

鹽酸與硫代硫酸鈉反應將產生白色硫沉澱，此時我們利用濁度計測量濁度數值，整理數據後可經由數學方法求得反應速率定律式，接著逐步分析阿瑞尼斯方程式的各項參數。

二、實驗步驟：

(一) 初期速率法求反應級數：

1.求m：準備五組相同體積不同濃度的HCl水溶液，分別與5mL,0.1M的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 反應。 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 與HCl被控制在同一溫度，實驗開始時，將燒杯中的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 倒入裝有HCl的試樣瓶並開始計時，同時迅速將其送入濁度計。

2.求n：準備五組相同體積不同濃度的HCl水溶液，分別與5mL,0.1M的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 反應。

(二) 改變反應溫度

1.選定溫度： $12^\circ\text{C}、17^\circ\text{C}、22^\circ\text{C}、30^\circ\text{C}、35^\circ\text{C}$

2.不同溫度下以初期速率法求反應級數與反應速率常數

(三) 加入界面活性劑(十二烷基硫酸鈉)(SDS)

1.0.1克SDS水溶液+50g水(0.2%)(圖四)

2.每組實驗加入2滴SDS水溶液

(圖四)

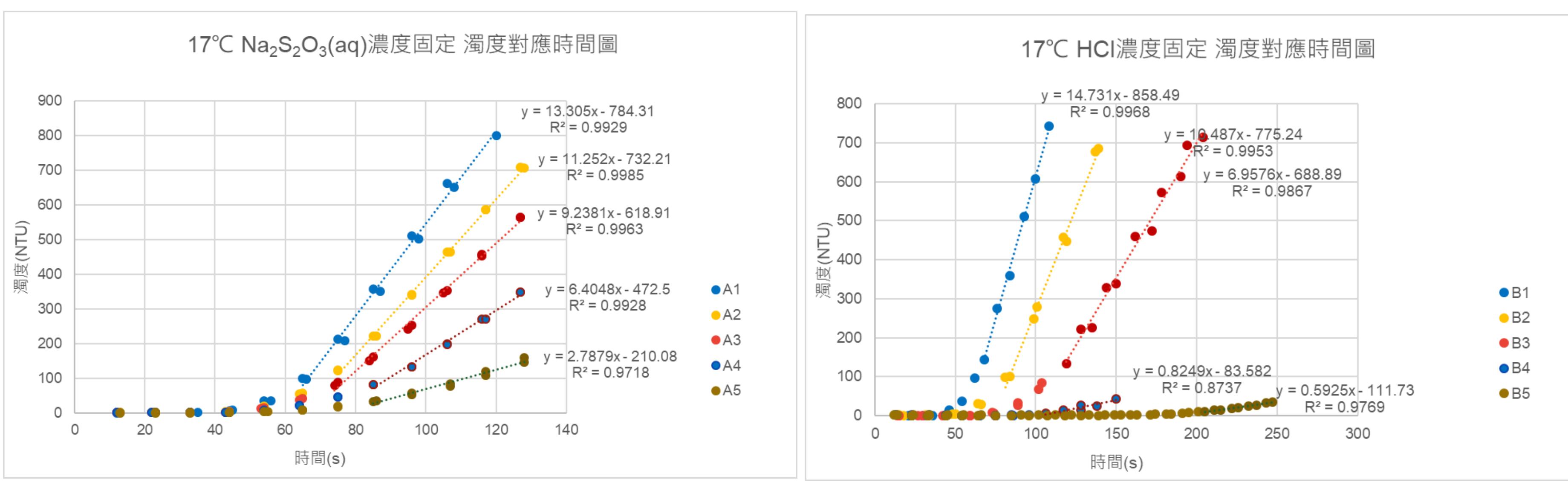
(來源：作者自行拍攝)



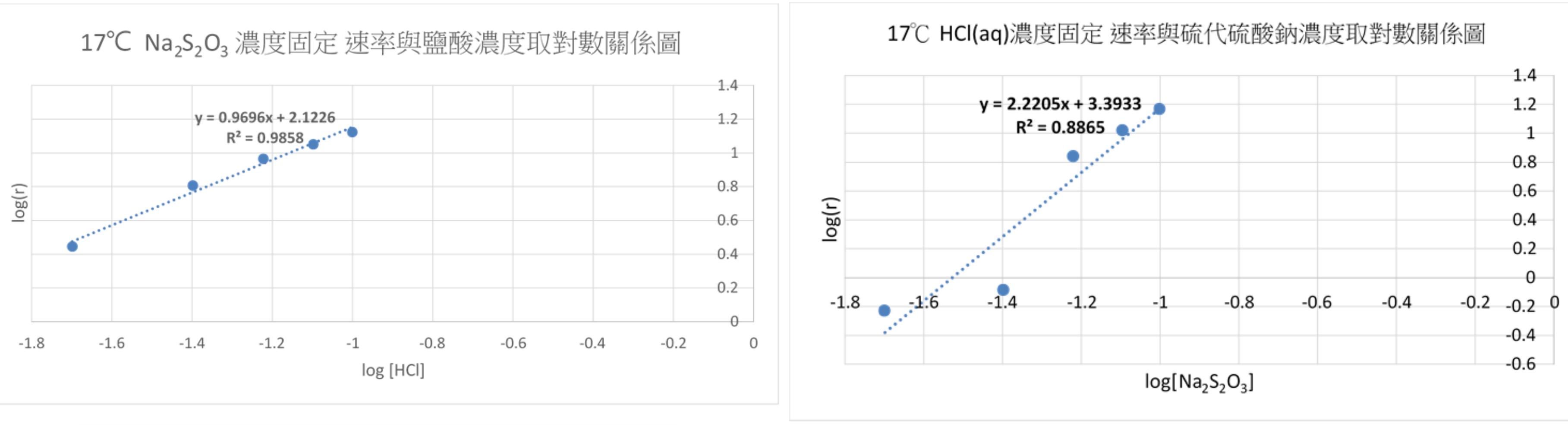
# 一、研究結果與討論

一、濁度計測量結果：(圖片來源：作者以Excel自行繪製)  
以下以17°C未加界面活性劑的實驗結果為例，說明數據分析後所得之圖表與反應速率表的製作方法，其他溫度之作圖與分析方法皆相同。

## 1. 求反應速率： $r = \frac{\Delta \text{濁度}}{\Delta t}$ = 時間對應濁度數據微分



## 2. 求m、n: $\log r = \log k + m \log [\text{HCl}] + n \log [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ ， 固定 $n \log [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 求m，反之亦然



## 3. 求反應速率常數k值: 將其中一組濃度的r、 $[\text{HCl}]$ 、 $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3]$ 、m、n代回定律式

## 4. 求活化能: 對阿瑞尼烏斯方程式兩邊同取自然對數後作圖，並分析其斜率與截距，對應活化能Ea與前指數因子A (刪去12°C數值)

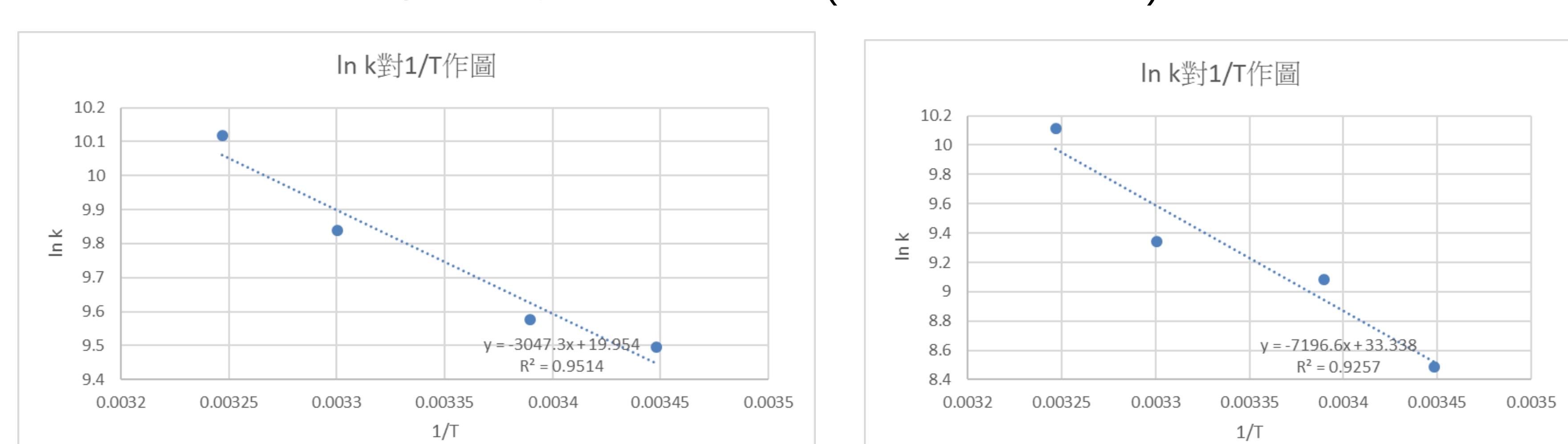


圖4-6 無界面活性劑下 $\ln k$ 對 $1/T$ 作圖

圖4-7 有界面活性劑下 $\ln k$ 對 $1/T$ 作圖

## 研究結果：

未加界面活性劑在不同溫度下的級數

溫度(°C) (未加 SDS)	m (HCl(aq)濃度 係數)	n ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (aq)濃 度係數)
12	0.93	1.44
17	0.97	2.22
22	0.91	1.68
30	0.85	1.81
35	0.80	1.63

加界面活性劑在不同溫度下的級數

溫度(°C) (加入 SDS)	m (HCl(aq) 濃度係數)	n ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (aq) 濃度係數)
12	0.89	1.55
17	1.13	2.04
22	0.86	2.27
30	0.73	1.42
35	1.00	1.43

## k值整理表

溫度(°C)	無加界面 活性劑k值	有加界面 活性劑k值
12	9831.2	9874.6
17	13305	4856.3
22	14422	8798.8
30	18730	11386
35	24776	24648

無界面活性劑:

$$Ea \doteq 25.34 \text{ kJ/mol}, A = 4.6 \times 10^8$$

有界面活性劑:

$$Ea \doteq 59.83 \text{ kJ/mol}, A = 3.0 \times 10^{14}$$

## 二、分光光度計驗證測量結果：

以下以30°C未加界面活性劑的實驗結果說明數據分析後所得之結果與濁度計於相同溫度之測量結果相符合：

級數部分( $m=0.84$ 、 $n=1.85$ )，與濁度計測量後得到的級數( $m=0.85$ ， $n=1.81$ )結果相符。

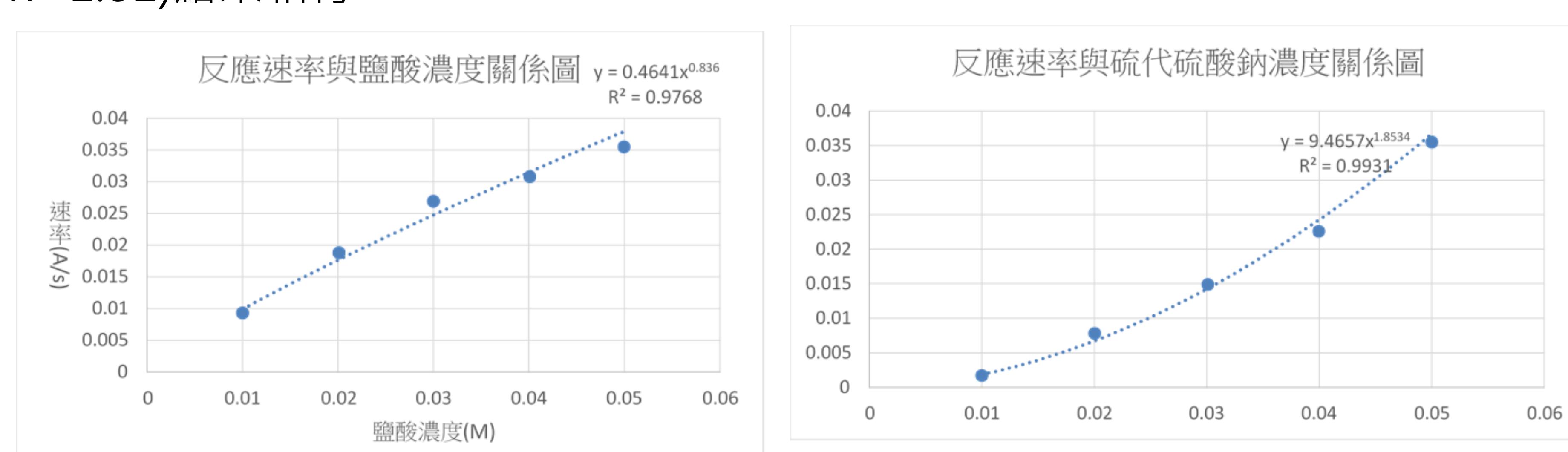


圖4-9 反應速率與鹽酸濃度關

圖4-10 反應速率與硫代硫酸鈉濃度關係

■ 觀察到約350 ~ 400nm有吸收峰，因此使用波長400nm的入射光測量硫粒子的吸收度

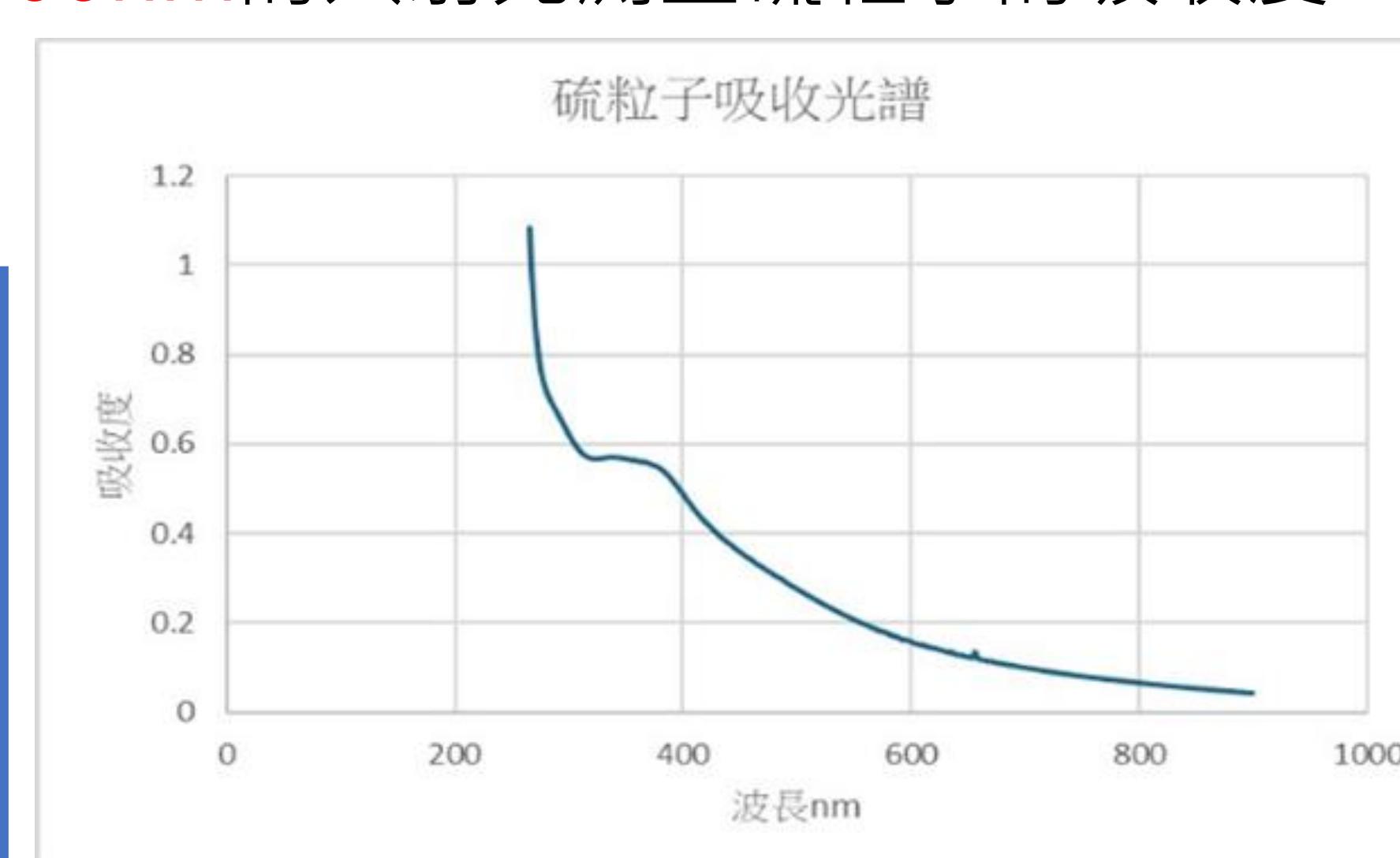


圖4-8 硫粒子吸收光譜圖

(來源：師大化學分析實驗室測得再由作者自繪)

## 三、雷射粒徑分析儀驗證界面活性劑在反應中的影響

利用光散射原理，測量溶液中粒子的粒徑大小及分佈證實SDS主要透過電荷排斥，阻礙硫核聚集，沒有改變反應級數，只使速率常數k值變小。

### 表4-7界面活性劑添加與否測得的硫粒徑數據

測量時間與反應條件	未加界面活性劑	加界面活性劑
90秒	平均粒徑:374.5nm	平均粒徑:286.5nm
300秒	平均粒徑:702.6nm	平均粒徑:345nm



圖4-11未加界面活性劑硫粒徑測量數據圖  
(來源：師大化學分析實驗室測量數據拍攝)

## 柒、結論

我們測量在不同溫度( $12^{\circ}\text{C}$ 、 $17^{\circ}\text{C}$ 、 $22^{\circ}\text{C}$ 、 $30^{\circ}\text{C}$ 、 $35^{\circ}\text{C}$ )及界面活性劑(SDS)有無的條件下，硫析出所造成的濁度隨時間的變化，通過多次測量濁度與時間的數據，我們整理出反應速率定律式中  $\text{HCl(aq)}$  與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  的反應級數為  $m$ 、 $n$  值，及反應速率常數  $k$  數值，前指數因子  $A$  與活化能  $Ea$  等數據，整理如下表：

溫度及條件 (未加 SDS)	$m$	$n$	$k$	$A$	$Ea$
$12^{\circ}\text{C}$	1	2	9831.2		
$17^{\circ}\text{C}$	1	2	13305	$4.6 \times 10^8$	$25.35 \text{ kJ/mol}$
$22^{\circ}\text{C}$	1	2	14422		
$30^{\circ}\text{C}$	1	2	18730		
$35^{\circ}\text{C}$	1	2	24776		

溫度及條件 (未加 SDS)	$m$	$n$	$k$	$A$	$Ea$
$12^{\circ}\text{C}$	1	2	9874.6		
$17^{\circ}\text{C}$	1	2	4856.3	$3.0 \times 10^{14}$	$59.83 \text{ kJ/mol}$
$22^{\circ}\text{C}$	1	2	8798.8		
$30^{\circ}\text{C}$	1	2	11386		
$35^{\circ}\text{C}$	1	2	24648		

綜合實驗結果整理成以下幾點說明：

一、 $\text{HCl(aq)}$  與  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{aq})$  的反應級數為  $m$ 、 $n$  值，在不同溫度下及有 / 無界面活性劑(SDS)時，大致維持  $m=1$ 、 $n=2$ ，可以推論 **反應機構在  $17^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  時應相同**。

二、速率常數  $k$  值，隨溫度上升而遞增，也符合反應機構在  $17^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  時應相同的推論。

三、加入 界面活性劑SDS，使  $k$  值在中溫區段( $17^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ )顯著下降，例如在  $22^{\circ}\text{C}$  時加入 SDS 使  $k$  由  $1.44 \times 10^4 \rightarrow 0.88 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ， $Ea$  同步由  $25 \text{ kJ mol}^{-1}$  增至約  $60 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，搭配粒徑由  $375 \text{ nm}$  降至  $287 \text{ nm}$  的結果，可推論 SDS 於硫核表面形成陰離子吸附層，**增加表面能障，抑制聚集**，從而拉長成長期，顯示反應機構未變，而反應速率變小。

四、比較  $k$  值可見：在中溫  $17^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  區段，添加 SDS 後  $k$  值大幅下潛（如  $17^{\circ}\text{C}$  由  $1.33 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$  降至  $4.86 \times 10^3 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； $22^{\circ}\text{C}$  由  $1.44 \times 10^4 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$  降至  $8.80 \times 10^3 \text{ NTU}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ），但於**極低  $12^{\circ}\text{C}$  及極高  $35^{\circ}\text{C}$  兩端則近乎無差異**。

五、關於高低溫的  $k$  值，幾乎不受有 / 無界面活性劑(SDS)影響的推論：

(1)  **$17^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$  時 SDS 陰離子可在硫核表面形成穩定吸附層，新增表面能障**，使  $Ea$  由  $25 \rightarrow 60 \text{ kJ mol}^{-1}$ ，因而顯著降低  $k$  值

(2)  **$35^{\circ}\text{C}$  時熱能足以克服或削弱該吸附屏障，抑速效果被「溫度加速」抵消**

(3)  **$12^{\circ}\text{C}$  時整體碰撞頻率已是速率瓶頸，SDS 再增能障的相對效應不顯著**

(4) **低溫  $12^{\circ}\text{C}$  時溶解度不足**，可用單體量低。當界面活性劑濃度低於 CMC 時，分子主要以單分子分散在水相中，無法聚集形成微胞，所以  $k$  值不受影響。

備註: CMC ( Critical Micelle Concentration，臨界微胞濃度)，指的是界面活性劑在溶液中由「單分子狀態」轉變為「自發聚集形成微胞 (micelle)」時的臨界濃度。

## 捌、未來展望

一、本研究界面活性劑，粒徑結果已顯示 SDS 可穩定在  $\sim 300 \text{ nm}$  以內，後續對奈米硫尺寸控制的影響，以界面活性劑的不同種類，來控制平均粒徑  $< 300 \text{ nm}$  的條件，未來可延伸至硫陰極預製或農業殺菌劑。

二、未來的應用方面：

(1) 在 **Li-S 電池陰極前驅物合成** 中，測試  $< 300 \text{ nm}$  S 顆粒對電池容量的影響。

(2) 評估作為農用懸浮式殺菌劑時，SDS-包覆奈米硫的分散穩定度。以上將基礎動力數據轉化為電化學與農業化學應用。

## 玖、參考文獻

一、碘酸鹽型碘鐘反應之動力學的定量研究 <Https://Twsf.Ntsec.Gov.Tw/Activity/Race-1/51/Pdf/040203.Pdf>

二、界面活性劑對硫奈米微粒形成機制的影響。臺北市立第一女子高級中學。李祐慈。臺灣2002年國際科學展覽會化學科第一名

三、阿瑞尼斯方程式

<Https://Zh.Wikipedia.Org/Zhtw/%E9%98%BF%E4%BC%A6%E5%B0%BC%E4%B9%8C%E6%96%AF%E6%96%B9%E7%A8%8B>

四、碘鐘交響曲-反應速率與反應級數

<Https://Teaching.Ch.Ntu.Edu.Tw/Gclab/Wp-Content/Uploads/Manual-%E7%A2%98%E9%90%98%E5%AF%A6%E9%A9%97%EF%BC%8D%E7%A2%98%E9%90%98%E4%BA%A4%E9%9F%BF%E6%9B%8B.Pdf>

五、吳尚容. (2010). 自製濁度計量測三種微藻濃度變化之研究 [碩士論文, 國立臺灣大學]. 臺灣大學機構典藏.

<Https://Tdr.Lib.Ntu.Edu.Tw/Bitstream/123456789/10616/1/ntu-99-1.Pdf>

六、Spectrophotometry. (2025, February 19). In Wikipedia. <Https://En.Wikipedia.Org/Wiki/Spectrophotometry>