

逢甲大學學生報告 ePaper

韋森堡效應探討

Investigation on the Weissenberg Effect

作者：黃翊婷、詹毅暘、賴亮衛、洪紹恩、郭子郡、紀家順

系級：精密系統設計學士學位學程三

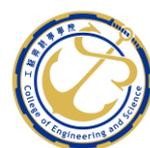
學號：D0850631、D0808133、D0850661、D0850467、D0877080、D0887377

開課老師：陳建羽 教授

課程名稱：機密系統設計學士學位學程

開課系所：精密系統設計學士學位學程

開課學年：110 學年度 第二學期



## 中文摘要

流變學是門探討複雜高分子材料液態流動行為之科學，其生活中最常見例子包含澱粉液、番茄醬及油漆等非牛頓流體物質，其流動性質相較一般牛頓流體(水、酒精)，黏度受溫度、剪切率影響甚大，其中最為著名的表觀現象即韋森堡效應(爬竿效應)。本研究透過自行設計的量測機構探討中筋及低筋麵粉分別與水配置的澱粉水溶液之比例在不同轉速下所形成爬竿高度差異，以質化探討不同剪切率在不同比例之澱粉溶液所形成爬竿高度差異，進而理解剪切稀化對溶液黏度影響。實驗結果顯示，爬竿高度隨著轉速越快而致使剪切率提升並導致剪切稀化效應趨於明顯而越高，此外，當溶液越濃稠(黏度越高時)，韋森堡效應越顯著。本專題研究成果及自行開發之教具預期提供學員更認識牛頓及非牛頓流體在流動行為之差異。

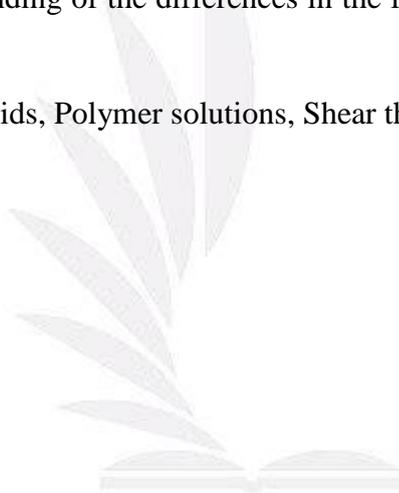
### 關鍵字：

韋森堡效應、教學教具、高分子溶液、剪切稀化、非牛頓流體

## Abstract

Rheology is to explore the complex polymer material liquid flow operation for science, of which common examples in life include starch liquid, ketchup and paint and other non-Newtonian fluid substances, the fluidity of this kind of body compared to the more general Newtonian fluid(water and alcohol), viscosity by temperature, shear rate of the substance is very large, the most famous of which is the existing Weissenberg effect(Rod-climbing). In this study, the self-designed measuring mechanism explored the difference in the height of climbing rods formed by the proportions of medium gluten and low gluten flour and the starch aqueous solution of water configuration at different speeds, and the difference in climbing rod height formed by different shear rates in different proportions of starch solutions was discussed qualitatively, and then the effect of shear thinning on the viscosity of the solution was understood. Experimental results show that the height of the climbing rod increases with the faster the rotational speed, resulting in an increase in shear rate and a significant shear thinning effect, in addition, the more concentrated the solution (the higher the viscosity), the more pronounced the Weissenberg effect. The research results of this topic and the self-developed teaching aids are expected to provide students with a better understanding of the differences in the flow behavior of Newtonian and non-Newtonian fluids.

**Keywords:** Non-Newtonian fluids, Polymer solutions, Shear thinning, Teaching aids, Weissenberg effect



## 目 次

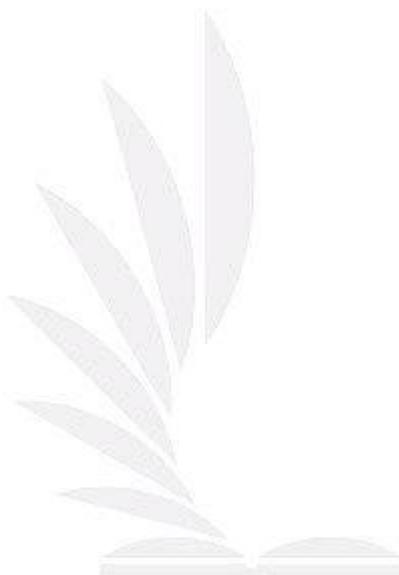
壹、研究背景.....	6
貳、研究動機與目的.....	7
參、研究方法及流程.....	8
3.1 韋森堡效應實驗教具之機構設計以及程式規劃.....	8
3.2 實驗設置及流程.....	9
3.3 實驗步驟.....	9
肆、實驗結果與討論.....	10
4.1 低筋麵粉水溶液實驗結果.....	10
4.2 中筋麵粉水溶液實驗結果.....	11
4.3 觀察兩種不同麵粉實驗後所獲得的紀錄進行討論.....	12
4.3.1 黏度的不同.....	12
4.3.2 轉速的不同.....	14
4.4 韋森堡效應分析.....	15
4.5 剪切增稠與剪切稀化的判斷.....	16
伍、結論.....	17
5.1 結論.....	17
5.2 教具材料與成本規劃.....	17

## 圖目錄

圖 1 韋森堡效應示意圖.....	6
圖 2 韋森堡效應教學教具.....	7
圖 3 Arduino 及電池線路圖 .....	8
圖 4 為森堡效應實驗教具之爆炸圖與 BOM 表.....	9
圖 5 不同溶液各 100 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響.....	12
圖 6 不同溶液各 105 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響.....	12
圖 7 不同比例的低筋麵粉同一轉速對攀升高度的影響.....	13
圖 8 不同比例的中筋麵粉同一轉速對攀升高度的影響.....	13
圖 9 不同轉速同一低筋麵粉克數：水克數對攀升高度的影響.....	14
圖 10 不同轉速同一中筋麵粉克數：水克數對攀升高度的影響.....	14
圖 11 韋森堡原理示意圖.....	15
圖 12 不同溶液各 110 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響...	16
圖 13 不同轉速中筋麵粉 70 克：100 克水對攀升高度的影響.....	16

## 表目錄

表 1 低筋麵粉水溶液(麵粉 100g、105g、110g 比水 100g)實驗數據表 .....	10
表 2 低筋麵粉水溶液(麵粉 120g/125g/130g/135g/140g 比水 100g)實驗數據表.....	10
表 3 中筋麵粉水溶液實驗數據表.....	11
表 4 教具材料與成本規劃表.....	17



## 壹、研究背景

在我們向指導老師詢問我們的畢業專題並進行發想及討論時，指導老師向我們介紹了一個科學效應，韋森堡效應(Weissenberg effect)，又稱爬竿效應或是包軸效應。此效應於 1944 年由Karl Weissenberg 所提出，在一個裝有高分子非牛頓流體的燒杯放入一個圓棒，並進行轉攪拌實驗。對於牛頓流體，由於慣性所形成的離心力佔據了主導的地位，液面中心將呈凹形，並往杯壁延伸。而對於具有彈黏性非牛頓流體，卻會向杯中心流動，並沿中心圓棒向上爬，液面變成凸形，甚至在實驗圓棒旋轉速度很低時，也可以觀察到這一現象。

韋森堡效應的原理是因為靠近轉軸表面的切線速度較大，轉軸表面分子被拉伸排向並纏繞在軸表面，而拉伸排向後的高分子鏈有自發恢復至自由捲曲態之傾向，故造成轉軸上液體的拉力，進而產生向心法向應力，驅使液體產生向心運動，最終當法向應力與慣性力(離心力)達到平衡。液體向心運動造成中心密度及壓力增加並表現在徑向上，其中也使軸向產生軸向應力，造成液體上部壓力低，底部壓力大，故液體會沿軸向上爬升，最終與重力達到平衡態，這就是韋森堡效應的基本原理。

在設計混合器、非牛頓流體的運輸泵以及對某些高分子塑料進行加工時都需要考慮到爬竿效應的影響，而在生活中也可以看到韋森堡效應的影子，像是攪拌水泥、油漆、麥芽膏等高彈黏度的流體。

### Rod Climbing Effect

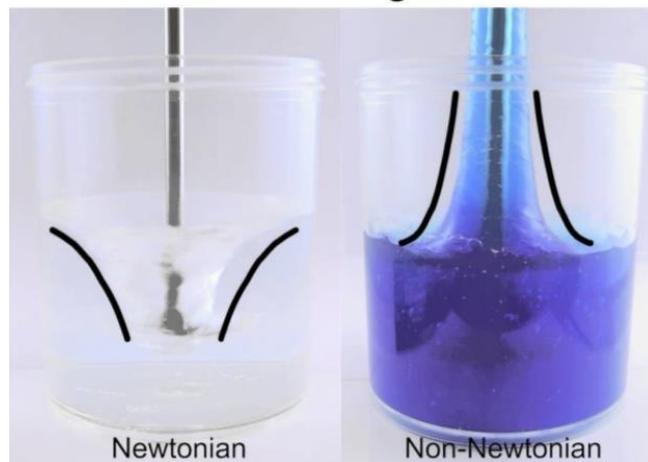


圖1 韋森堡效應示意圖

當時老師向我們介紹這個對抗牛頓定律的現象時，引發我們的好奇與關注，這也使我們專題研究的方向目標朝向了這個方向發展。

## 貳、研究動機與目的

經由網路上瀏覽資料以及查詢資料時，韋森堡效應在網路上能查到的訊息不多，而且大部份的資訊都是點到為止，能夠搜尋到的東西大同小異，不然就是國外的研究論文。這也使發現流變學在台灣的開發相對其他國家是比缺少的，但其實流體在生活隨處可見，對我們是不可或缺的。因此決定

## 韋森堡效應探討

既然在網路上能夠獲得的資料相對有限，那何不自己對韋森堡效應進行研究，再將它推廣給更多人認識。

從一開始購買簡易的馬達、支架進行實驗，在實驗以及研究之後發現，雖然要從韋森堡效應計算出高分子溶液的黏度以及其背後各種數據的數值其實是相對困難，但是透過觀察巨觀現象，並藉由更改溶液其黏度以及攪拌之轉速去觀察其科學原理是相對簡單以及有趣的，它的難易度就像是國、高中所學到的虹吸現象，連通管原理等，用於國、高中的實驗課程上是相對合適的，慢慢的設備越來越齊全，因此決定開發一個韋森堡效應教學教具，如圖 2。



圖2 韋森堡效應教學教具

加上 108 課綱，推動實驗實作課程以增加孩子們學習的樂趣，從實驗上去建立孩子們的自信心，自然領域強調探究與實作精神與方法，激發學生思考能力及意願，希望能藉由此教具去推廣韋森堡效應，讓孩童們從小就對流變學有些許的印象，認識什麼是牛頓流體，什麼是非牛頓流體。也讓學生們透過彈性的實驗課程、分組合作去激發思考意願及能力，強調在操作實驗的過程中發現問題，使有更多動手操作與思考的機會，期待能看見現象後連結背後可能的知識，進而設定問題，擁有想辦法解決問題的能力，引導將看見的東西敘述出來，並在敘述問題中找到能探究的內容，增加未來學術探討的能力。

## 參、研究方法與流程

### 3.1 韋森堡效應實驗教具之機構設計以及程式規劃

韋森堡實驗教學教具包含：馬達、鋁棒、聯軸器、鋁擠型支架、壓克力馬達支架、電池、電池座、L298N 馬達驅動模組、螺桿升降系統、Arduino 開發版、麵包版、顯示模塊、收納箱、電線、按鈕、包線管、螺絲等五金。

起初實驗操作只有鋁擠型支架以固定的高度支撐著馬達，並用電腦連接 Arduino，及操控馬達轉速去進行實驗，但為求方便寫出能用按鈕就能控制

韋森堡效應探討

馬達的程式，程式裡包含：

- (1) 按下黃色按鈕就能啟動馬達，並以按一下增加 50(rpm)為基礎，最高上限為300(rpm)並持續循環
- (2) 按下紅色按鈕則將馬達歸零

綜合上述兩點將馬達的目標轉速以及當前轉速回傳並顯示於 LCD 顯示面板。  
Arduino 開發線路如，圖 3。

#### ※ 配置麵包版

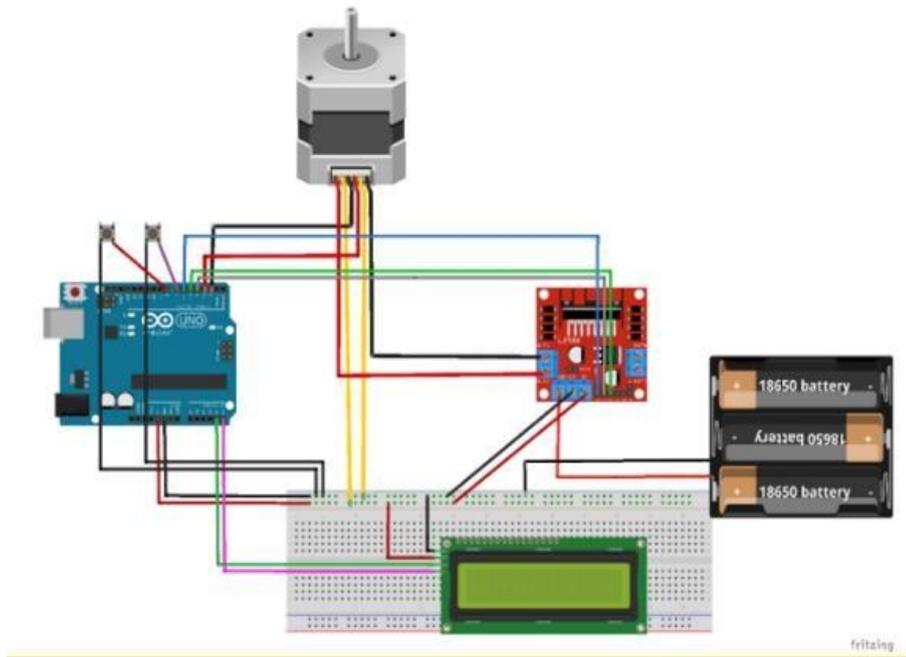


圖3 Arduino 及電池線路圖

再來增加了螺桿升降系統搭配壓克力板支架，使馬達的高度能上下調整。為求整潔以及乾淨，將電線及各個線路板進行整理，一同放置於背後的收納箱，這樣韋森堡實驗教具就此完成，並且使用備有 USB 插孔的電源即可進行運作，像是行動電源、USB 插座頭、延長線等。

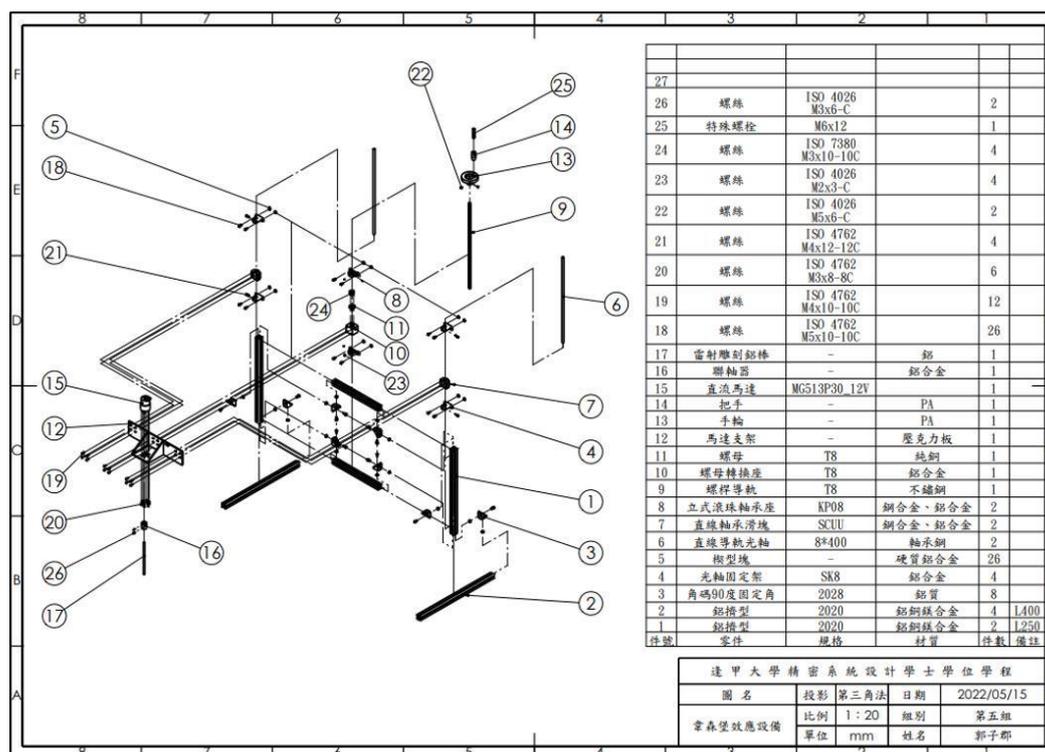


圖4 為森堡效應實驗教具之爆炸圖與 BOM 表

### 3.2 實驗設置及流程

此實驗將對低筋麵粉、中筋麵粉與水依照不同的比例混和，並在每一組的麵粉水溶液裡用不同的轉速 (50(rpm)~300(rpm))進行。每一組的時間設定為馬達啟動後 90 秒，依照鋁棒上的刻度來判斷韋森堡效應的爬竿高度。每組進行五次紀錄，最後取平均值來當作最終結果。並利用以上結果來觀察以及探討以下不同現象：

1. 觀察不同溶液及黏度對爬竿效應的影響。
2. 不同轉速(剪切率)對爬竿效應的影響。
3. 爬竿效應巨觀性質之成因觀察。
4. 牛頓流體與非牛頓流體之比較。
5. 轉速的影響以及慣性的平衡。
6. 觀察麵粉加水能形成爬竿效應的最小黏度。
7. 剪切增稠或剪切稀化的觀察。

### 3.3 實驗步驟

1. 將麵粉與水在燒杯中混和攪拌均勻。
2. 將燒杯置於設備中央並將圓棒放入溶液中。
3. 啟動馬達開始旋轉圓棒直到杯中溶液狀態保持穩定。
4. 停止馬達轉動，紀錄溶液的爬竿高度。

5. 將圓棒取出並擦拭乾淨，重複進行五次上述實驗記錄。
6. 等比例增加轉速或麵粉跟水之比例，並重複上述實驗。

#### 肆、實驗結果與討論

##### 4.1 低筋麵粉水溶液實驗結果

將低筋麵粉與水的比例分為，麵粉 100g、105g、110g 比水 100g 各進行了 50、100、150、200、250、300(rpm)不同轉速下的實驗，每組進行五次，一次 90 秒，且每一次實驗都會攪拌一次以防止麵粉沉澱。紀錄如下：

表1 低筋麵粉水溶液(麵粉 100g、105g、110g 比水100g)實驗數據表

麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數
100	100	0	6	50	1	105	100	0	8	50	1	110	100	0	15	50	1
		0	8		2			0	14		2						
		0	7		3			0	8		3			0	13		3
		0	7		4			0	8		4			0	13		4
		0	6		5			0	10		5			0	15		5
		0	9	100	1			0	10	1	0			15	1		
		0	5		2			0	13	2	0			18	2		
		0	5		3			0	11	3	0			18	3		
		0	8		4			0	11	4	0			20	4		
		0	8		5			0	11	5	0			16	5		
		0	15	150	2			0	14	1	0			25	1		
		0	18		3			0	15	2	0			26	2		
		0	14		4			0	12	3	0			20	3		
		0	16		5			0	14	4	0			19	4		
		0	16		5			0	11	5	0			20	5		
		0	12	200	1			0	15	1	0			28	1		
		0	11		2			0	20	2	0			28	2		
		0	11		3			0	14	3	0			20	3		
		0	10		4			0	9	4	0			20	4		
		0	10		5			0	13	5	0			28	5		
		0	2	250	1			0	15	1	0			28	1		
		0	22		2			0	19	2	0			27	2		
		0	2		3			0	13	3	0			27	3		
		0	20		4			0	17	4	0			21	4		
		0	0.9		5			0	17.5	5	0			24	5		
0	5	300	1	0	14	1	0	27	1								
0	9		2	0	14	2	0	27	2								
0	11		3	0	16	3	0	27	3								
0	11		4	0	15	4	0	28	4								
0	10		5	0	15	5	0	24	5								

再來是低筋麵粉與水的比例分為，麵粉 120g、125g、130g、135g、140g 比水 100g 各進行了 100、200、300(rpm)轉速範圍級距較大的實驗。紀錄如下：

表2 低筋麵粉水溶液(麵粉 120g/125g/130g/135g/140g 比水 100g)實驗數據表

麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數
120	100	0	16	100	1	130	100	0	22	100	1	140	100	0	25	100	1
		0	17		2			0	25		2			0	25		2
		0	20		3			0	24		3			0	24		3
		0	18		4			0	26		4			0	20		4
		0	19		5			0	28		5			0	25		5
		0	30	1	0			38	1	0	34			1			
		0	23	2	0			38	2	0	25			2			
		0	18	3	0			36	3	0	37			3			
		0	28	4	0			35	4	0	30			4			
		0	25	5	0			35	5	0	27			5			
		0	26	1	0			37	1	0	36			1			
		0	25	2	0			40	2	0	35			2			
		0	33	3	0			40	3	0	35			3			
		0	30	4	0			34	4	0	39			4			
		0	32	5	0			41(51)	5	0	33			5			
125	100	0	18	100	1	135	100	0	32	100	1	140	100	0	23	100	2
		0	17.5		2			0	23		2			0	20		3
		0	16		3			0	20		3			0	21		4
		0	16		4			0	21		4			0	19		5
		0	17.5		5			0	19		5			0	30		1
		0	24	1	0			31	2	0	31			2			
		0	23.5	2	0			35	3	0	35			3			
		0	30	3	0			35	4	0	32			5			
		0	20	4	0			37	1	0	51			2			
		0	19	5	0			40	3	0	40			3			
		0	49	1	0			39	4	0	39			4			
		0	43	2	0			39	5	0	31			5			
		0	43	3													
		0	39	4													
		0	39	5													

#### 4.2 中筋麵粉水溶液實驗結果

中筋麵粉與水的比例分為，麵粉 70g、80g、90g、100g、105g、110g 比水100g 各進行了 50、100、150、200、250、300(rpm)的實驗。紀錄如下：

表3 中筋麵粉水溶液實驗數據表

麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高度(mm)	轉速(rpm)	次數
70	100	0	2	50	1	80	100	0	3	50	1	90	100	0	10	50	1
		0	3		2			0	3		2			0	11		2
		0	2		3			0	3		3			0	9		3
		0	3		4			0	2		4			0	10		4
		0	3		5			0	3		5			0	9		5
		0	4	1	0			5	1	0	12			1			
		0	5	2	0			4	2	0	11			2			
		0	3	3	0			5	3	0	10			3			
		0	4	4	0			4	4	0	11			4			
		0	4	5	0			4	5	0	13			5			
		0	6	1	0			6.5	1	0	12			1			
		0	4	2	0			6	2	0	10			2			
		0	4	3	0			5	3	0	13			3			
		0	5	4	0			6	4	0	17			4			
		0	5	5	0			6	5	0	13			5			
		0	7	1	0			5	1	0	15			1			
		0	7	2	0			7	2	0	16			2			
		0	4	3	0			4	3	0	15			3			
		0	3	4	0			5	4	0	14			4			
		0	5	5	0			7	5	0	17			5			
		0	6	1	0			6	1	0	17			1			
		0	4	2	0			7	2	0	16			2			
		0	4	3	0			7	3	0	14			3			
		0	6	4	0			6	4	0	16			4			
		0	6	5	0			5	5	0	21			5			
		0	5	1	0			7	1	0	17			1			
		0	4	2	0			10	2	0	15			2			
		0	4	3	0			9	3	0	20			3			
		0	6	4	0			9	4	0	19			4			
		0	5	5	0			9	5	0	17			5			

麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高 度(mm)	轉速 (rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高 度(mm)	轉速 (rpm)	次數	麵粉(g)	水(g)	結果	舉升高 度(mm)	轉速 (rpm)	次數				
100	100	0	24	50	1	105	100	0	20	50	1	110	100	0	23	50	1				
		0	23		2			0	18		2			0	23		2				
		0	25		3			0	20		3			0	22		3				
		0	28		4			0	20		4			0	31		4				
		0	11		5			0	20		5			0	21		5				
		0	22	100	1			0	36	100	1			0	35	100	1	0	35	100	1
		0	19		2			0	34		2			0	40		2				
		0	22		3			0	27		3			0	37		3				
		0	20		4			0	35		4			0	46		4				
		0	19		5			0	29		5			0	45		5				
		0	26	150	1			0	38	150	1			0	47	150	1	0	47	150	1
		0	35		2			0	29		2			0	43		2				
		0	41		3			0	29		3			0	53		3				
		0	30		4			0	34		4			0	59		4				
		0	34		5			0	29		5			0	51		5				
		0	28	200	1			0	45	200	1			0	49	200	1	0	49	200	1
		0	27		2			0	54		2			0	59		2				
		0	27		3			0	40		3			0	56		3				
		0	27		4			0	50		4			0	48		4				
		0	28		5			0	41		5			0	67		5				
		0	31	250	1			0	59	250	1			0	64	250	1	0	64	250	1
		0	31		2			0	49		2			0	72		2				
		0	33		3			0	45		3			0	67		3				
		0	33		4			0	51		4			0	80		4				
		0	39		5			0	54		5			0	79		5				
		0	32	300	1			0	59	300	1			0	76	300	1	0	76	300	1
		0	32		2			0	44		2			0	67		2				
		0	39		3			0	64		3			0	54		3				
		0	39		4			0	49		4			0	70		4				
		0	33		5			0	59		5			0	56		5				

### 4.3 觀察兩種不同麵粉實驗後所獲得的紀錄進行討論

#### 4.3.1 黏度的不同

隨著溶液黏度的增加爬竿現象也較於顯著，因為黏度越高的非牛頓流體所具有的黏彈特性較強，分子鏈也較長，由於這個原因，溶液在恢復自由捲曲時的法向應力越大，爬竿現象也就較明顯。

圖 5、圖 6 是中低筋麵粉同比例同轉速得實驗結果數據圖，實驗前已知中筋麵粉的黏度比低筋麵粉高，因此從數據圖來看可明顯看出，中筋麵粉跟低筋麵粉在同比例且同轉速的狀況下，中筋麵粉水溶液的攀升高度比低筋麵粉水溶液高上許多。圖 7、圖 8 分別為中筋及低筋水溶液不同比例同轉速對攀升高度的影響，當調配的水溶液麵粉比例越高，黏度也會相對來講越來越高，故也可從此看出當黏度越大時，攀爬的現象就越明顯。

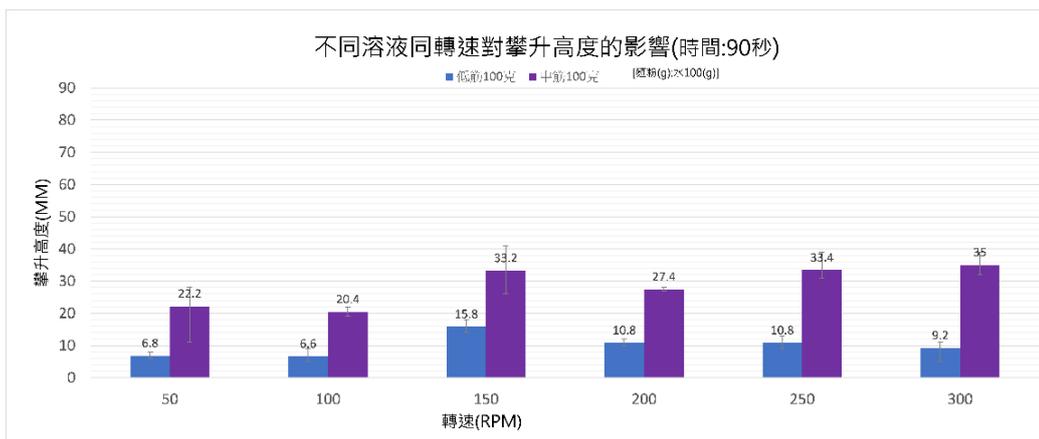


圖5 不同溶液各 100 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響

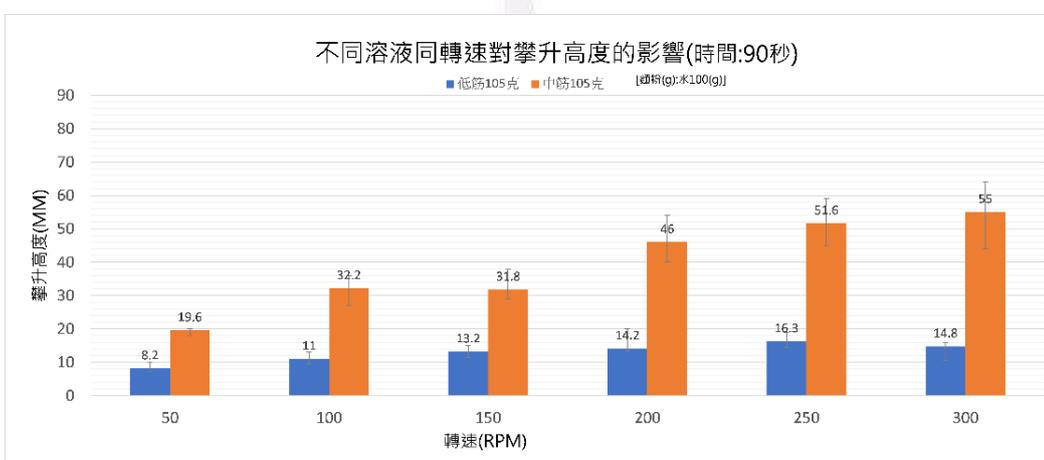


圖6 不同溶液各 105 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響

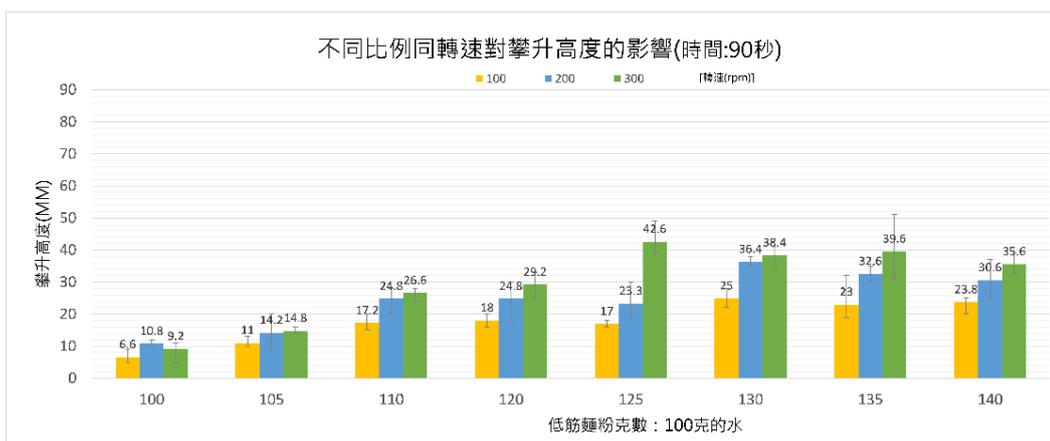


圖7 不同比例的低筋麵粉同一轉速對攀升高度的影響

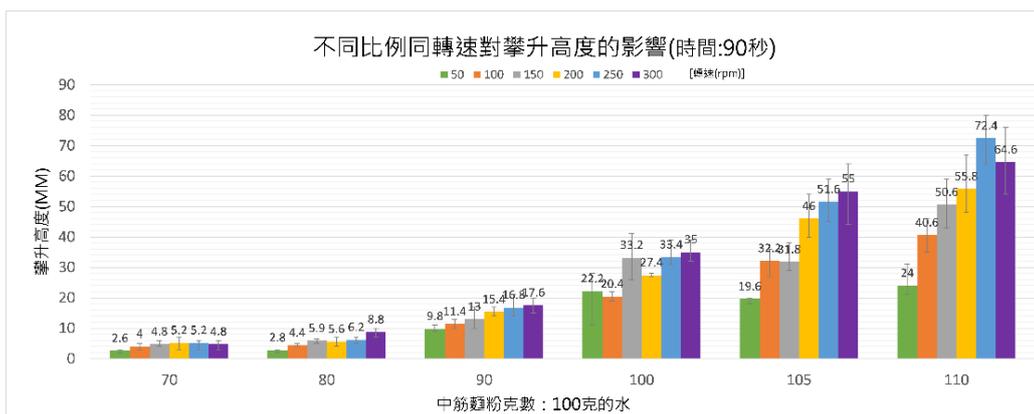


圖8 不同比例的中筋麵粉同一轉速對攀升高度的影響

### 4.3.2 轉速的不同

轉速的增強會度對溶液的剪切力增大，受到拉伸力變大，恢復時所產生的鏡像應力也就越大，這也會造成爬竿高度的提升。可以看到有些比例的麵粉水溶液受到較大的剪切(轉速變高時)反而爬竿高度下降了，這是因為圓棒轉速提升到一定值時，所產生的慣性力太大，導致恢復捲曲時產生的法向應力不足跟慣性力平衡，所以導致轉速提升爬竿高度反而下降。

圖 9、圖 10 是分別為中筋及低筋水溶液同比例不同轉速對攀升高度的影響，可以看到不管是中筋還是低筋麵粉水溶液，當轉速越大時，攀升的高度就越高。

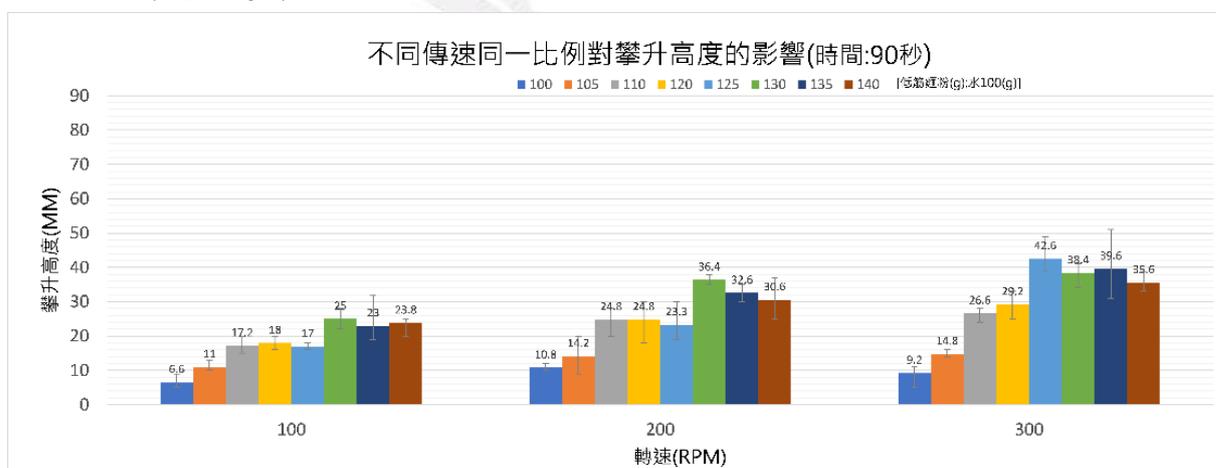


圖9 不同轉速同一低筋麵粉克數：水克數對攀升高度的影響

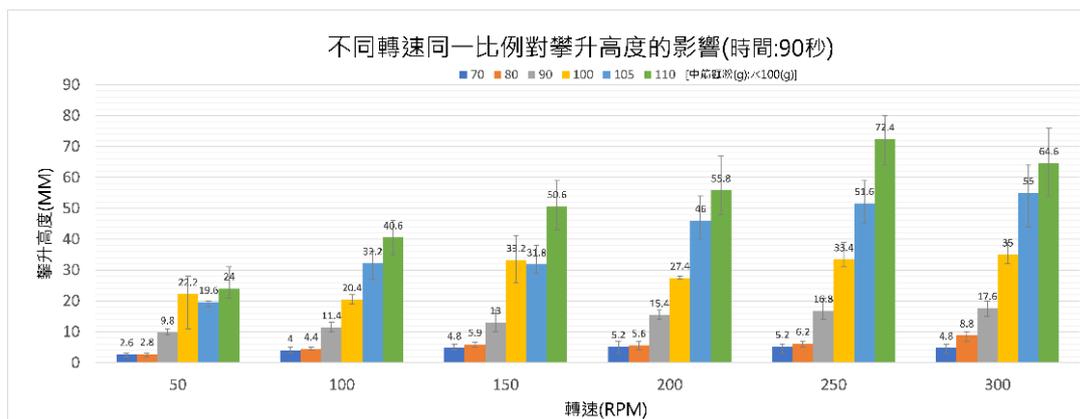


圖10 不同轉速同一中筋麵粉克數：水克數對攀升高度的影響

#### 4.2 韋森堡效應分析

透過實驗原理以及觀察實驗現象，對溶液所受到的力進行分析得到了以下結果，如圖 11 所示。當圓棒在溶液裡開始旋轉時，產生了藍色箭頭的剪切力，由於高分子溶液具有黏彈性的特性，被拉伸後會恢復自由捲曲，形成了紅色的法向應力。當溶液往中間擠壓時，中間壓力變高，開始往圓棒進行爬升，這就是造成溶液像轉軸爬升的軸向應力。最後當法向應力、軸向應力與慣性力、重力趨於平衡後，就是韋森堡效應的最終平衡狀態。經過多次實驗發現麵粉水溶液平均平衡時間約於 60 秒左右，故將每次實驗的時間訂為 90 秒。

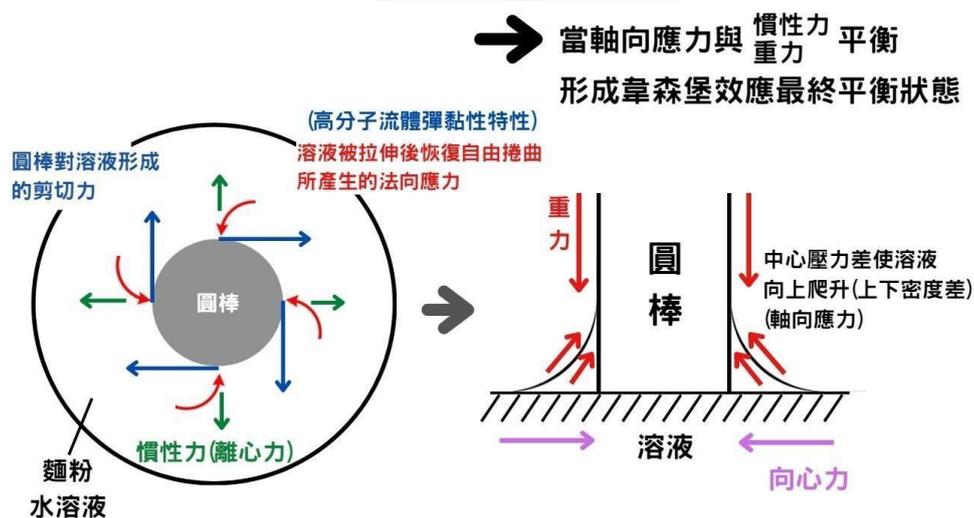


圖 11 韋森堡原理示意圖

#### 4.5 剪切增稠與剪切稀化的判斷

從韋森堡效應可以得知攀升的高度會跟溶液的黏度成正比。圖 12 為低筋麵粉 110g 比水100g 跟中筋麵粉 110g 比水100 克的長條圖。雖然中筋麵粉在 250rpm 的紀錄略為突出，但是平均觀察下來，不管是中筋還是低筋麵粉水溶液受到的剪切力越大，黏度坡度就越平緩。

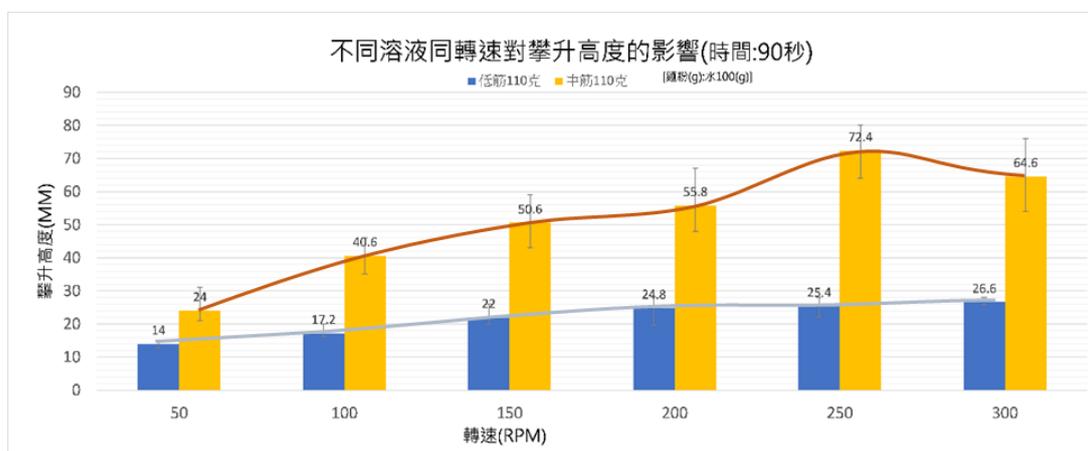


圖12 不同溶液各 110 克麵粉：100 克水在不同轉速下對攀升高度的影響

從不同比例的麵粉來比較。圖 13 為中筋麵粉 70g 與水100g 實驗記錄平均後的長條圖。將攀升高度的比例放大後，可以更明顯的感受到黏度比剪切力的曲線逐漸平緩且略微降低。

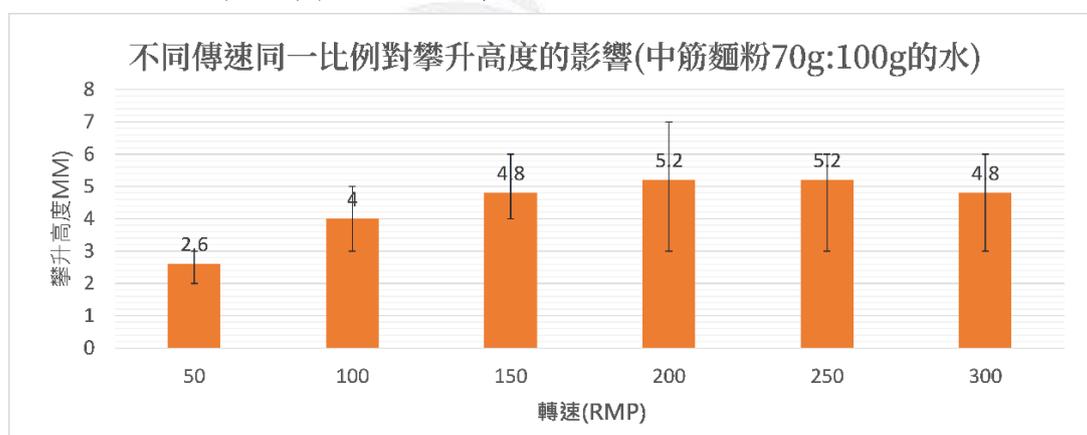


圖13 不同轉速中筋麵粉 70 克：100 克水對攀升高度的影響

由實驗紀錄發現不同比例的麵粉水溶液幾乎都是呈現上述圖表中的現象。所以在上述兩個不同麵粉水溶液的圖表中可以發現，當轉速愈高，也就是剪切率越大時，黏度與應力的梯度是漸漸降低的。透過逐漸平緩的指數坡度，可以得知當麵粉水溶液受到的剪應力越大，黏度也逐漸降低，藉此我們可以判斷麵粉水溶液在非牛頓流體中是屬於剪切稀化。如果與上述現象相反，在溶液受到越大的剪切力，黏度反而呈現指數增大時，則是剪

切增稠。

不管溶液是剪切稀化或是剪切增稠，在設計混合器、非牛頓流體的運輸泵或是對某些高分子塑料進行加工時，會受到蠻大的影響，都要納入參考並進行設計，可以藉此效應做一個簡單的判斷。

## 伍、結論

### 5.1 結論

本文探討使用中筋及低筋麵粉與水調配出不同比例在不同轉速下，爬竿高度的差別，以及透過實驗現象去了解剪切稀化對黏度的影響，相關實驗歸納結果如下：

1. 分別由低筋及中筋的同比例不同轉速、不同比例同轉速及用不同麵粉同比例同轉速來比較出的實驗結果，攪拌後液面中心成凹狀。
2. 非牛頓流體，如麵粉水溶液，達到一定黏度後會產生韋森堡效應。
3. 黏彈度越高的流體將產生越明顯的爬竿效應。麵粉增加後，爬竿現象較明顯。
4. 當轉速越增加，爬竿高度越高。轉速增加後爬竿效應較明顯。
5. 麵粉水溶液的爬竿現象約在60秒與慣性及重力呈現平衡穩定狀態。
6. 麵粉水溶液在非牛頓流體裡屬於剪切稀化，指剪應力增加而流體的黏度與速度則會降低。
7. 於每次實驗將確實攪拌均勻，否則麵粉沉澱會影響實驗紀錄。

### 5.2 教具材料與成本規劃

最後統整出開發韋森堡效應教具的成本規劃：

表4 教具材料與成本規劃表

品項	數量	價格(元)	品項	數量	價格(元)
馬達	1 個	300	按鈕	2 顆	4
鋁棒+聯軸器	1 組	85	1602 LCD 板	1 個	75
螺桿升降系統	1 組	1206	12V 電池盒	1 個	30
壓克力支撐板	1 個	420	18650 電池	3 顆	300
L298N 驅動	1 個	60	麵包板	1 個	30
Arduino Uno 板+連接線	1 組	300	線路+螺絲+包線管等雜項		150
收納箱	1 個	300			

韋森堡效應實驗教具最終成本，共計: 3260 (元)

### 參考文獻

- [1] J.M. Dealy, T.K.P. Vu, “The Weissenberg effect in molten polymers,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 127-140 (1977).
- [2] M. Yamamoto, “The visco-elastic properties of network structure III. Normal stress effect (Weissenberg effect),” *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 13, pp. 1200-1211 (1958).
- [3] M. Kontopoulou, “*Applied Polymer Rheology: Polymeric Fluids with Industrial Applications*,” 1st Edn., John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Canada (2012).

