

第十屆旺宏科學獎

創意說明書

參賽編號：SA10-473

作品名稱：磁敏感性凝膠的製備與應用

姓名：陳碩甫

關鍵字：吉利丁、磁場、水合離子團

摘要

本實驗針對凝膠的吸水敏感性進行探討，並加入交聯劑改良凝膠的穩定性。實驗發現凝膠的吸水行為對於環境變化具高敏感性：交聯濃度越高，其吸水率越低；溶液越酸或越鹼，其吸水率越高；磁場強度越強，其吸水率有減小的趨勢。

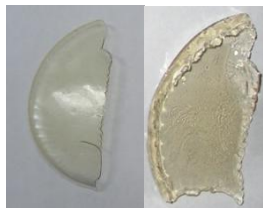
我先後以「重量增加率」→「溶質滲透率」→「溶質釋放率」曲線討論凝膠的吸水模型，並以水合離子團解釋凝膠、離子與磁場的交互作用。由於凝膠具有「可調控」的吸水性質，因此可以藉由酸鹼值或外加磁場的變化，達到特定區域、特定時間釋放溶質的目的，應用於肥料施放、藥物膠囊、痠痛貼布等，能增加溶質釋放的精確性與使用效率。

壹、研究動機

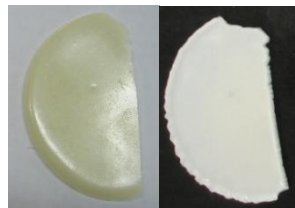
一碗被遺忘在冰箱中的布丁，意外地開啟了我的專題研究。

我發現：布丁如果不加蓋，放置數天以後，竟會形成一片硬脆的「乾布丁」！這種「乾布丁」不僅觸感細緻光滑，更具有良好的通透性與吸水率，能膨潤至初始的凝膠狀態。我對布丁的吸水過程感到十分好奇，便著手探討布丁凝膠在不同變因下的吸水行為。

有趣的是一凝膠的吸水行為具有高度的敏感性，易受到酸鹼值與磁場的影響。但這過程究竟是如何呢？施加磁場前後，凝膠的結構又有甚麼不同？初步實驗結果顯示：若在凝膠中加入溶質，則在吸水的過程中，溶質也會不斷地釋放出來。那麼利用凝膠「可調控」的吸水性質，是否進而能調控溶質的釋放率呢？這個有趣的發現讓我對凝膠有了嶄新的認識與應用。



▲圖 1：凝膠吸水前後



▲圖 2：奶酪吸水前後

貳、研究目的

- 一、研究凝膠的凝膠結構與吸水性質
- 二、製備及改良凝膠的機械強度與穩定性
- 三、探討酸鹼值對凝膠吸水率的影響
- 四、探討磁場強度對凝膠吸水率的影響
- 五、以凝膠為滲透膜，研究外加磁場對離子滲透速率的影響
- 六、以凝膠為載體，討論外加磁場對離子釋放速率的影響
- 七、解釋凝膠的吸水模型與磁場的交互作用
- 八、將「遙控凝膠」的敏感性應用於肥料施放、藥物釋放等

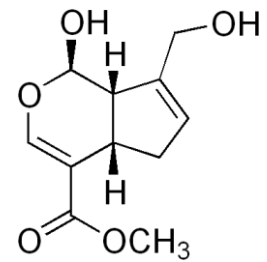
參、研究設備及器材

一、實驗藥品

Gelatin	Genipin	硝酸鈉	硝酸鎂
硝酸鋁	硝酸鉀	鹽酸	氫氧化鈉

※ 改良前的凝膠成分：Gelatin

※ 改良後的凝膠成分：Gelatin+Genipin

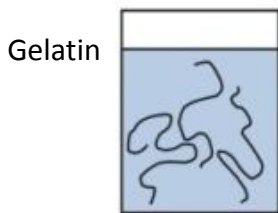


▲圖 3：Genipin 結構式

二、實驗器材

燒杯	試管	溫度計	玻棒	加熱板	電子天平
PH 計	導電度計	烘箱	冰箱	漆包線圈	直流供應器
透明塑膠管	熱熔膠	防水膠帶	石臘膜	鋁箔紙	培養皿

肆、實驗構思



【動機】凝膠的吸水行為對於環境變因具高敏感性

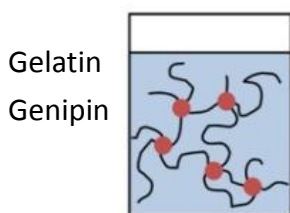
【目的】探討凝膠的吸水敏感性

【思考】由形成凝膠時的結構變化探討凝膠的吸水行為



【改良與製備】

由於第一代凝膠容易水解，且機械強度極差
故我在凝膠中添加交聯劑 Genipin，增加其穩定性。



【吸水敏感性】酸鹼值與磁場強度對凝膠吸水率的影響

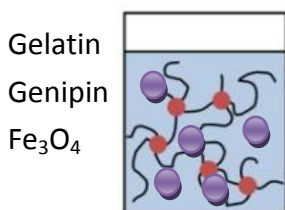
【滲透敏感性】探討不同離子之滲透行為

【釋放敏感性】探討不同離子之釋放行為



雖然第二代凝膠具有良好的滲透敏感性，但需要在極端的 pH 值，才會有良好的吸水與釋放敏感性，且其添加溶質必須為「帶電離子」。

為了使「磁敏感性凝膠」的應用範圍更廣，我決定在凝膠中添加不同的磁性粒子。



【創新改良】添加不同磁性粒子→以「氧化鐵凝膠」效果最佳

【擴大應用】磁敏感性更強，在中性環境也能具有高磁敏感性
且添加溶質可為「不帶電分子」

伍、實驗步驟

【實驗一】探討凝膠的凝膠結構

(一) 添加溶質對凝膠的影響

1. 取 0.9g 的吉利丁，溶於 3.0ml 的水中。
2. 20°C 下，分別加入表 1 中不同溶液 3.0ml，並混合均勻，1 分鐘後放入保險絲，以保險絲的浮沉觀察其凝膠情形。

去離子水	0.5M NaNO _{3(aq)}	0.5M Mg(NO ₃) _{2(aq)}	0.5M Al(NO ₃) _{3(aq)}	0.5M CuSO _{4(aq)}
0.5M CoCl _{2(aq)}	0.5M 葡萄糖 _(aq)	95% 乙醇	葉綠素溶液	牛奶(酪蛋白)

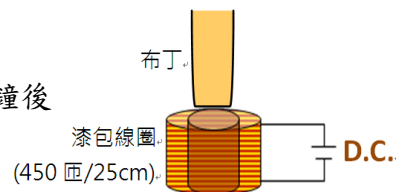
▲表 1：不同的添加溶液

(二) 酸鹼值對凝膠的影響

1. 取 0.9g 的吉利丁，溶於 3.0ml 的水中。
2. 20°C 下，分別加入 pH 值=1、7、13 的水溶液 3.0ml，並混合均勻，1 分鐘後放入保險絲，以保險絲的浮沉觀察其凝膠情形。

(三) 磁場強度對凝膠的影響

1. 取 0.9g 的吉利丁，溶於 6.0ml 的水中，並倒入試管。
2. 恆溫 20°C，將試管置於不同磁場強度的漆包線圈上，10 分鐘後放入保險絲，以保險絲的浮沉觀察其凝膠情形。



【實驗二】凝膠的穩定性改良

(一) 製備不同交聯濃度的凝膠

1. 取 0.9g 的吉利丁溶於 3.0ml 之去離子水中，加熱至 50°C 完全溶解。
2. 分別取 0.005g、0.01g、0.03g、0.06、0.1g 之 Genipin 溶於 3.0ml 之去離子水中，恆溫 50°C 使之充分溶解。
3. 待吉利丁與 Genipin 完全溶解後，將步驟(1)、(2)之溶液依表 2 比例混合，混合時須不斷攪拌使 Genipin 分散均勻。

樣品	H ₂ O(ml)	Gelatin(g)	Genipin(g)
Ge0 (改良前)	6.0	0.9	0
Ge0.005	6.0	0.9	0.005
Ge0.01	6.0	0.9	0.01
Ge0.03	6.0	0.9	0.03
Ge0.06	6.0	0.9	0.06
Ge0.1	6.0	0.9	0.1

▲表 2：不同樣品的交聯濃度

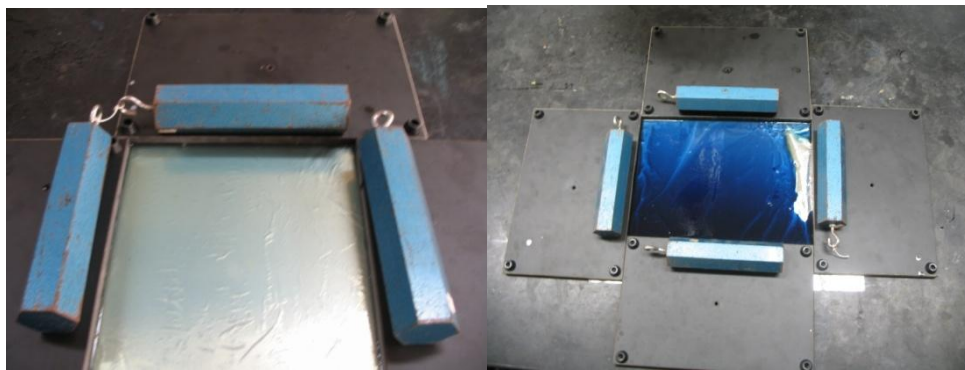
4. 將混合液倒入模具中，並置入約 4°C 的環境，使其樣品快速成型。
5. 成型後放置室溫約 3~5 天，使其完全交聯。

(二) 選擇最佳的交聯濃度

1. 巨觀上：比較不同樣品的顏色、彈性與硬度差異。
2. 微觀上：以顯微鏡觀測不同樣品的分子結構與吸水前後變化(預計)。
3. 酸鹼敏感性：
 - (1) 以 $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ 和 $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 配製 pH 值= 1、3、5、7、9、11、13 的水溶液。
 - (2) 將不同交聯濃度的樣品置於不同 pH 值的水溶液中，40 分鐘後取出秤重，比較其敏感性差異。
4. 綜合以上結果，選擇最佳的交聯濃度，做為往後實驗製備的基準。

【實驗三】「凝膠膜」的製備

1. 配製吉利丁溶液：取 9.0g 的吉利丁，溶於 60ml 的水中，並加入 0.05g 的 Genipin，恆溫 50°C 攪拌使之充分溶解。
2. 於水平桌面上平鋪一張鋁箔紙，並於四邊以重物與平板固定。將步驟(1)之吉利丁溶液緩緩倒入，液面保持水平，使凝膠厚度一致。
3. 靜置一星期，待其水分完全蒸發後，即完成凝膠膜的製備。



▲圖 7：凝膠膜的製備 (左)1hr 後 (右)2hr 後

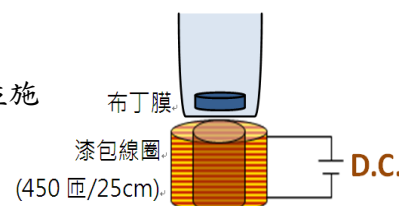
【實驗四】酸鹼值對凝膠吸水率的影響

1. 進行 pH 計的校正。
2. 以 $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ 和 $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 配製 pH 值=1、3、5、7、9、11、13 的水溶液。
3. 恆溫 20°C ，剪取凝膠膜 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ，置於不同 pH 值的水溶液中，每隔 10 分鐘取出秤重，計算其不同時刻之吸水率。

☐ 在本實驗中，我定義吸水率 = $\frac{\text{吸水後重量} - \text{吸水前原重}}{\text{吸水前原重}}$

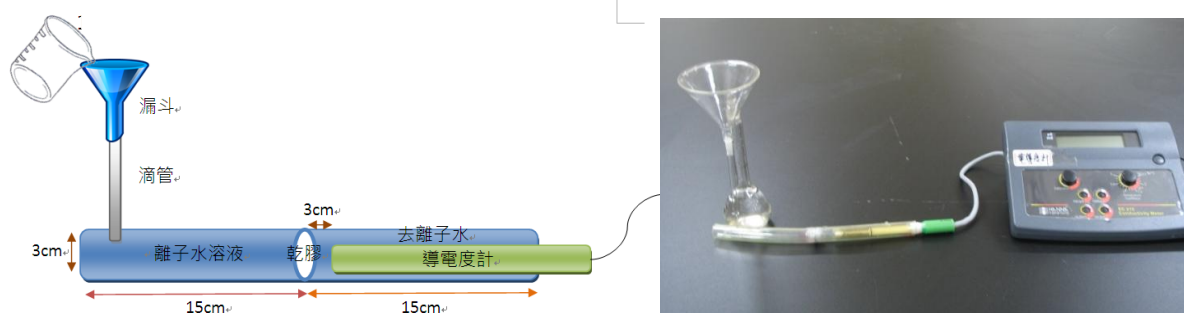
【實驗五】磁場強度對凝膠吸水率的影響

1. 利用直流電供應器、漆包線圈架設磁場裝置。
2. 恆溫 20°C ，剪取凝膠膜 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ，置於 pH=7.0 水溶液中，並施加不同強度的磁場，每隔 10 分鐘取出秤重，計算其吸水率的變化。



【實驗六】自製儀器觀測溶質的滲透

1. 取一直徑 3 cm 的透明塑膠管，擷取兩段各 15cm，並使用砂輪機磨合兩端不平整處，使兩段塑膠管接合時能更緊密結合。
2. 用焊槍分別在塑膠管兩頭鑽一小洞，剪取直徑 3cm 的圓形凝膠膜，用熱熔膠黏於一端塑膠管上，並用力壓平，待熱熔膠硬化後，取另一段塑膠管，以相同方式黏合。
3. 切除多餘之凝膠膜與熱熔膠凝塊，接著以防水膠帶使之密合。最後，將左端之塑膠管用石蠟膜封口。



▲圖 8：自製儀器示意圖(左)、自製儀器實際照片(右)

【實驗七】探討帶電離子的滲透行為

(一) 製作離子濃度檢量線

1. 校正導電度計。
2. 配製不同濃度的離子溶液，測量其濃度與導電度的關係。

(二) 不同離子的滲透行為

1. 於自製儀器左端注入不同的離子溶液，於右端注入蒸餾水，並插入導電度計。
2. 記錄導電度隨時間的變化，討論凝膠吸水與離子滲透的情形。
3. 施以外加磁場(67.8G)，比較施加磁場前後離子的滲透曲線。

(三) 不同磁場強度的滲透行為

1. 於自製儀器左端注入硝酸鈉溶液，於右端注入蒸餾水，並插入導電度計。
2. 記錄導電度隨時間的變化，討論凝膠吸水與離子滲透的情形。
3. 施以外加磁場，比較不同磁場強度下，硝酸鈉的滲透曲線。

【實驗八】探討帶電離子的釋放行為

(一) 在凝膠中包覆硝酸鉀

1. 恆溫 50°C，取 0.9g 的吉利丁與 0.005 克的 Genipin 溶於 6.0ml 之去離子水中。
2. 加入 0.3g 之硝酸鉀，混合均勻使其完全溶解。
3. 將混合液倒入模具中，靜置數天使其水分蒸發至高度固定 0.1 公分。

(二) 施加磁場前後的釋放行為

1. 將包覆硝酸鉀的凝膠置入去離子水中，以導電度計測量其釋放濃度百分比。
2. 比較施加磁場前後，離子的釋放速率變化。

【實驗九】第三代凝膠：氧化鐵凝膠

(一) 改良：在凝膠中加入磁性物質

1. 取 0.9g 的吉利丁，溶於 6.0ml 的水中，並加入 0.005g 的 Genipin，恆溫 50°C 攪拌使之充分溶解。
2. 分別加入 0.3g 之鐵粉、氯化鐵溶液、氯化亞鐵溶液、奈米氧化鐵溶液，靜置並觀察其凝膠情形。

(二) 探討：添加氧化鐵對凝膠膨潤性質之影響

1. 剪取「添加氧化鐵」與「未添加氧化鐵」之凝膠各一片，置於去離子水中，比較其膨潤率與膨潤速率之差異。
2. 施以外加磁場，每個 15 分鐘切換一次開關，觀察其磁場對其膨潤速率之影響。

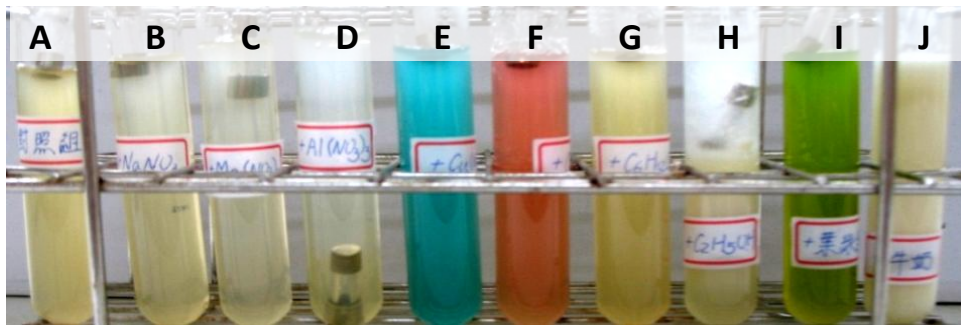
(三) 應用：藥物釋放與磁控膠囊

利用「氧化鐵凝膠」之吸水敏感性，針對真實藥物進行投藥測試

陸、實驗結果

【實驗一】探討凝膠的凝膠結構

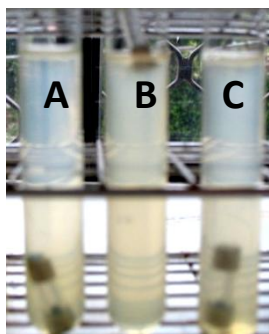
1. 添加溶質對凝膠的影響



	溶質	20°C凝膠情形	結果分析
A	無	凝膠	對照組
B	NaNO _{3(aq)}	凝膠，顏色變淡	加入帶電離子會使吉利丁溶液顏色變淡，不易形成凝膠，破壞程度：Al ³⁺ >Mg ²⁺ >Na ⁺
C	Mg(NO ₃) _{2(aq)}	凝膠，顏色變淡且機械強度變差	
D	Al(NO ₃) _{3(aq)}	無法凝膠，溶液顏色變淡	
E	CuSO _{4(aq)}	形成藍色凝膠	Cu ²⁺ 和 Co ²⁺ 與吉利丁的 COOH 螯合，而被包覆於膠體中
F	CoCl _{2(aq)}	形成紅色凝膠	
G	葡萄糖 _(aq)	凝膠	糖類分子能被包覆於膠體中
H	乙醇	白色沉澱	吉利丁遇乙醇、丙酮等有機溶劑等會變性，生成白色沉澱
I	葉綠素	綠色凝膠	色素能被包覆於膠體中，且不破壞凝膠
J	牛奶	白色凝膠	蛋白質能被包覆於膠體中，且不破壞凝膠

▲圖 9、表 3：添加溶質對凝膠的影響

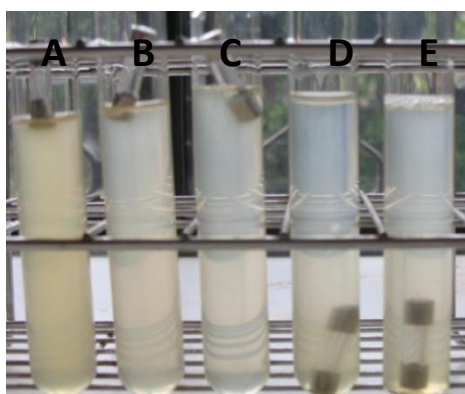
2. 酸鹼值對凝膠的影響



	溶液酸鹼值	凝膠情形
A	pH=1.0	無法凝膠
B	pH=7.0	凝膠
C	pH=13.0	無法凝膠

▲ 圖 10、表 4：酸鹼值對凝膠的影響

3. 磁場強度對凝膠的影響



	磁場強度	凝膠情形
A	0 高斯	凝膠
B	33.9 高斯	凝膠
C	67.8 高斯	凝膠 但機械強度變差
D	135.6 高斯	無法凝膠
E	217.2 高斯	無法凝膠

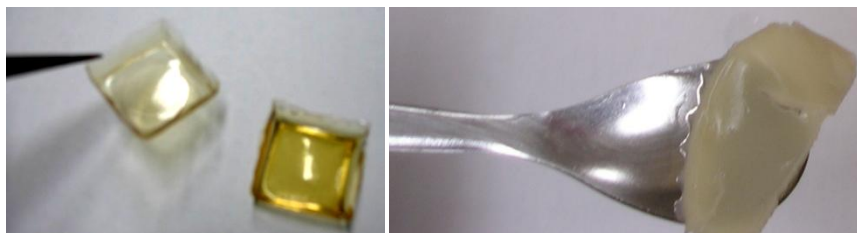
▲圖 11、表 5：磁場強度對凝膠的影響

磁場強度換算公式： $B = \mu_0 n I \times 10^4$ 其中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

B：磁場強度(高斯)	n：線圈密度(匝數/公尺)	I：電流(安培)
33.9	4500	1.5
67.8	4500	3
135.6	4500	6
217.2	4500	12

▲表 6：磁場強度與電流的換算





















接著，為了探討凝膠的吸水行為，我將凝膠置入水中，40 分鐘後約可增至原重的 4.66 倍。但原本硬脆的乾凝膠，在吸水後，已經無法用鑷子夾起（如圖 12），機械強度變差，顯示其結構的不穩定性。因此我想到：在凝膠中加入交聯劑，期望能增加凝膠的穩定性。






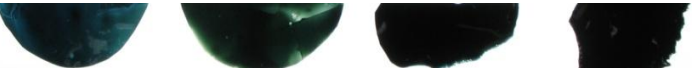
▲圖 12：(左)凝膠吸水前，光滑硬脆 (右)凝膠吸水後，機械強度差

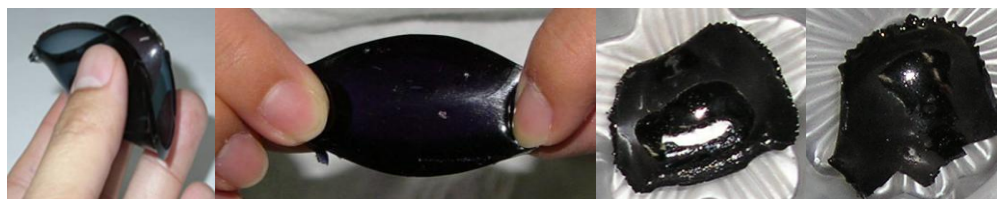
【實驗二】凝膠的穩定性改良

1. 交聯過程顏色變化(表 7)

樣品 時間	Ge0	Ge0.005	Ge0.01	Ge0.03	Ge0.06
1 小時後					
2 小時後					
3 小時後					
24 小時後					

2. 巨觀性質(表 8)

樣品	Ge0	Ge0.005	Ge0.01	Ge0.03	Ge0.06
顏色		淡—————→深 			
透光度		高—————→低 			
外觀	光滑平整，分布均勻→邊緣易皺縮，表面凹凸不平				
硬度	硬脆易碎	小（可用剪刀裁剪）→大（極硬，幾乎無法裁剪）			
彈性	差	佳（像塑膠片，柔韌有彈性）→差（像石頭）			
吸水情形	易水解 穩定性差	不易水解，穩定性佳 吸水後具有彈性（像果凍）			



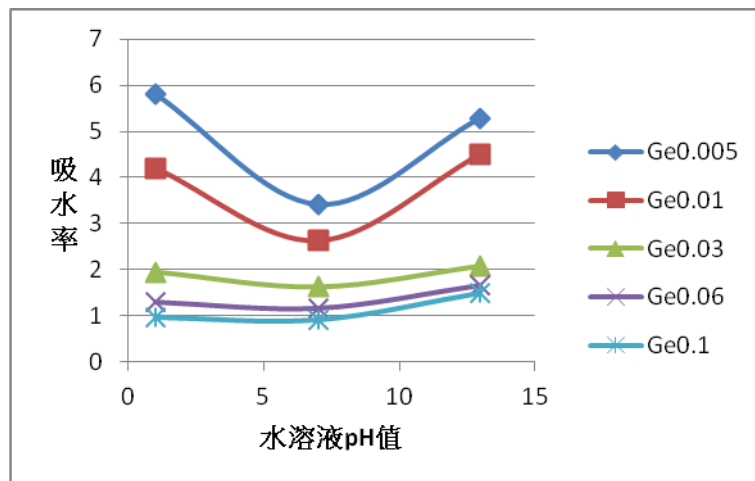
▲圖 13：不同樣品的彈性差異。由左而右：Ge0.005、Ge0.01、Ge0.03、Ge0.06

3. 酸鹼敏感性

(1) 40 分鐘後，不同樣品之吸水率(表 9)

	Ge0	Ge0.005	Ge0.01	Ge0.03	Ge0.06	Ge0.1
pH=1	水解	5.80	4.21	1.95	1.29	0.97
pH=7	3.66	3.41	2.62	1.52	1.16	0.92
pH=13	水解	5.28	4.51	2.08	1.66	1.41
平均值	無法計算	4.83	3.78	1.85	1.37	1.10

▲表 9：不同樣品 40 分鐘後之吸水率



▲圖 14：不同樣品 40 分鐘後之吸水率

結果分析：

在酸中及鹼中的吸水率大於中性環境下的吸水率

- Ge0.005：在酸中的吸水率大於在鹼中的吸水率
- Ge0.01、Ge0.03、Ge0.06、Ge0.1：在鹼中的吸水率大於在酸中的吸水率

(2) 不同樣品之酸鹼敏感性：

樣品	敏感性
Ge 0	無法計算
Ge 0.005	$5.80-3.41=2.39$
Ge 0.01	$4.51-2.62=1.89$
Ge 0.03	$2.08-1.52=0.56$
Ge 0.06	$1.66-1.16=0.5$
Ge 0.1	$1.41-0.92=0.49$

「酸鹼敏感性」定義：

圖中曲線各點最高值與最低值的差值

表 10 結果分析：

酸鹼敏感性

$Ge0.005 > Ge0.01 > Ge0.03 > Ge0.06 > Ge0.1$

【實驗三】「凝膠膜」的製備

「凝膠膜」成品外觀：

吸水前似塑膠片，能夠輕易凹成不同的形狀而不會斷裂，兼具彈性與韌性，光滑平整易裁切，透光呈現靛藍色。吸水後似果凍，柔韌而富彈性，不易碎裂或水解。



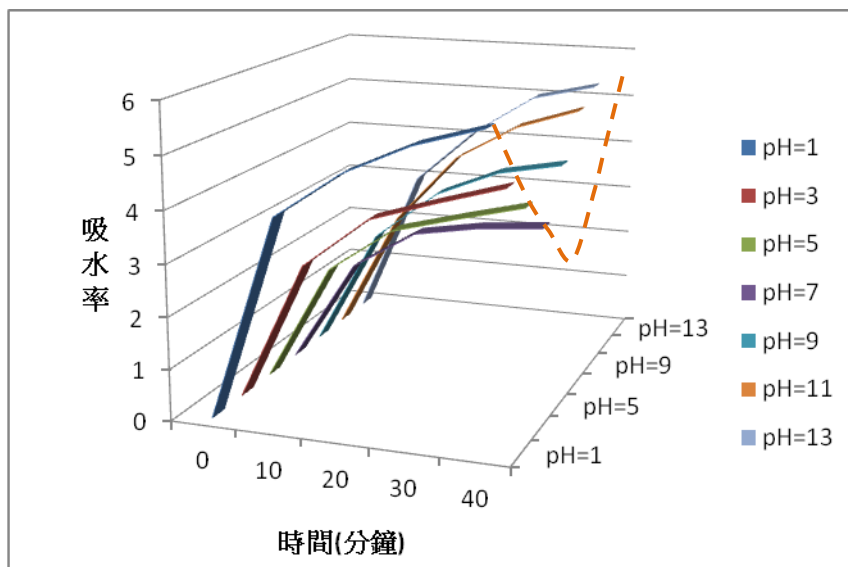
【實驗四】酸鹼值對凝膠吸水率的影響

1. 不同酸鹼值下，凝膠的重量變化(表 11)

時間 pH 值	時間				
	0min	10 min	20 min	30 min	40 min
1	0.0217	0.1074	0.1266	0.1393	0.14756
3	0.0212	0.0787	0.0998	0.108544	0.1166
5	0.0166	0.05474	0.069476	0.075188	0.08051
7	0.017	0.0515	0.064784	0.068614	0.07055
9	0.0136	0.04537	0.058881	0.066216	0.069632
11	0.0118	0.0404	0.0569	0.06568	0.070682
13	0.0106	0.04258	0.0546	0.06328	0.066568

2. 不同酸鹼值下，凝膠的吸水率(表 12、圖 17)

時間 pH 值	時間				
	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min
1	0	3.949309	4.834101	5.419355	5.8
3	0	2.712264	3.70755	4.12	4.5
5	0	2.29759	3.18529	3.5294	3.85
7	0	2.02941	2.810843	3.036145	3.15
9	0	2.336066	3.32951	3.868852	4.12
11	0	2.423729	3.822034	4.566102	4.99
13	0	3.016981	4.150943	4.969811	5.28



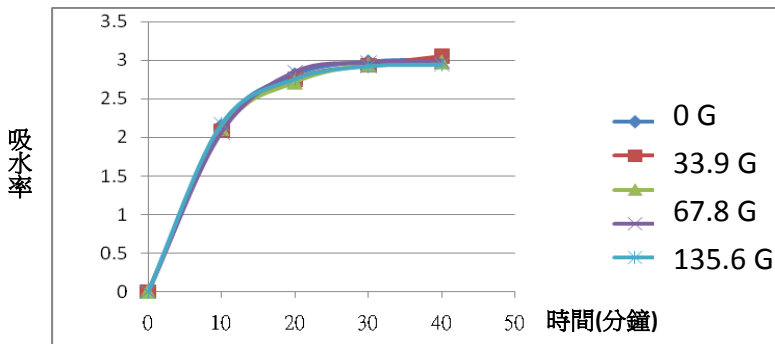
▲圖 17 結果分析：

平均吸水率：pH=1> pH=13>pH=12> pH=3> pH=9> pH=5> pH=7

在酸中及鹼中的吸水率大於在中性環境的吸水率，曲線成 V 字型(如圖中橘線)

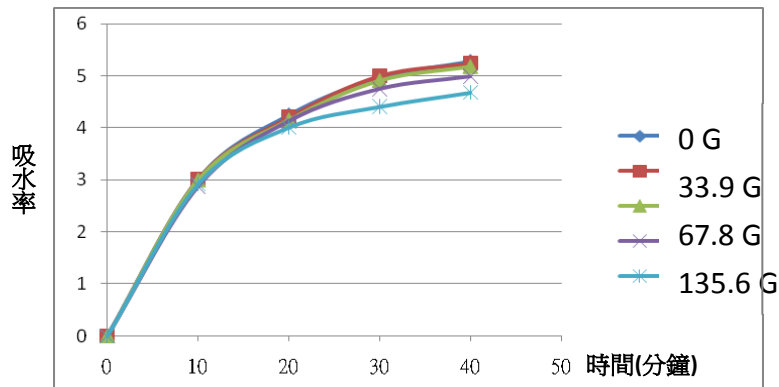
【實驗五】磁場強度對凝膠吸水率的影響

1. 在 pH=7 水溶液中，磁場強度對吸水率的影響(圖 18)



▲圖 18 結果分析：中性環境吸水率 217.2G = 135.6G = 67.8G = 33.9G = 0G

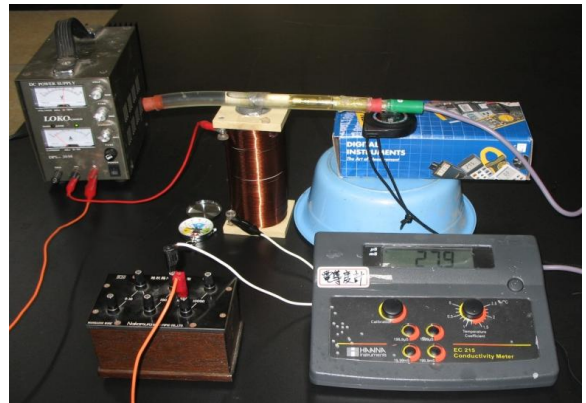
2. 在 pH=13 水溶液中，磁場強度對吸水率的影響(圖 19)



▲圖 19 結果分析：鹼性環境吸水率 217.2G < 135.6G < 67.8G < 33.9G < 0G

【實驗六】自製儀器觀測溶質的滲透

- 起初我以針筒為注射容器，但因針筒注射速率太慢，無法一次注射完畢，便改設計「漏斗+滴管」的裝置，使溶液可以快速加入，避免滲透時間上的誤差。
- 剛開始實驗時，中間的凝膠膜往往因膨潤受力不均而破裂。後來我在凝膠膜邊先用防水膠帶包一層，再用熱熔膠黏合，成功使膜的黏合端不會因膨潤而鬆弛。



【實驗七】探討帶電離子的滲透行為

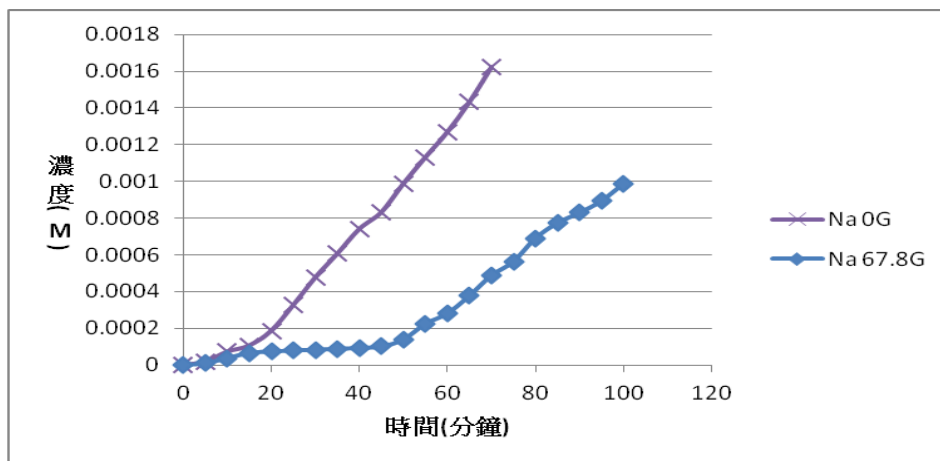
1. 硝酸鈉、硝酸鎂、硝酸鋁水溶液濃度與導電度的關係

(表 13 為各離子溶液在不同濃度下所相對應之導電度，單位為 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

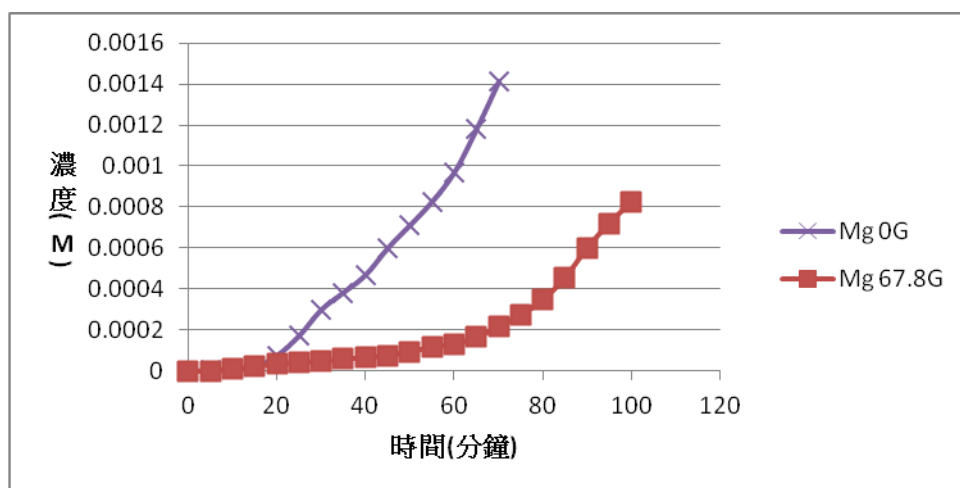
濃度	KNO_3	NaNO_3	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$
0.05M	6175	5272	10034	13402
0.025M	3101	3075	5174	7176
0.01M	1121	1196	2544	3760

0.005M	597	578	1335	2002
0.0025M	322	269	635	1050
0.001M	146	119	261	438

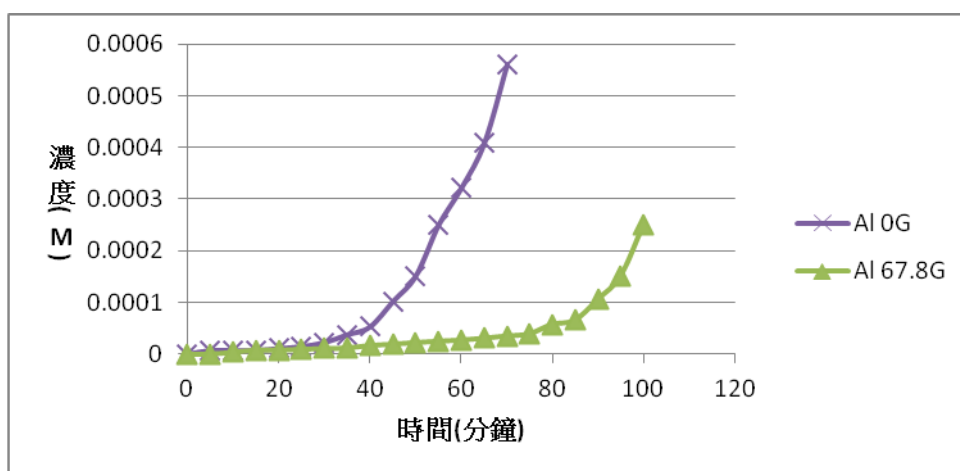
2. 硝酸鈉通過凝膠的濃度-時間圖(圖 20)



3. 硝酸鎂通過凝膠的濃度-時間圖(圖 21)



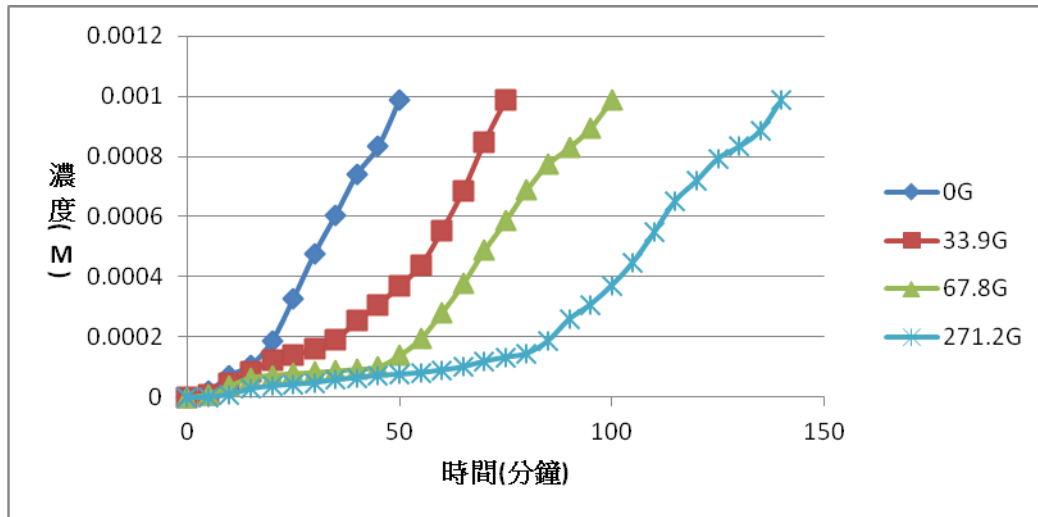
4. 硝酸鋁通過凝膠的濃度-時間圖(圖 22)



▲圖 20、21、22 結果分析：

- 滲透速率：硝酸鋁 < 硝酸鎂 < 硝酸鈉
- 有外加磁場(67.8G) < 無外加磁場(0G)

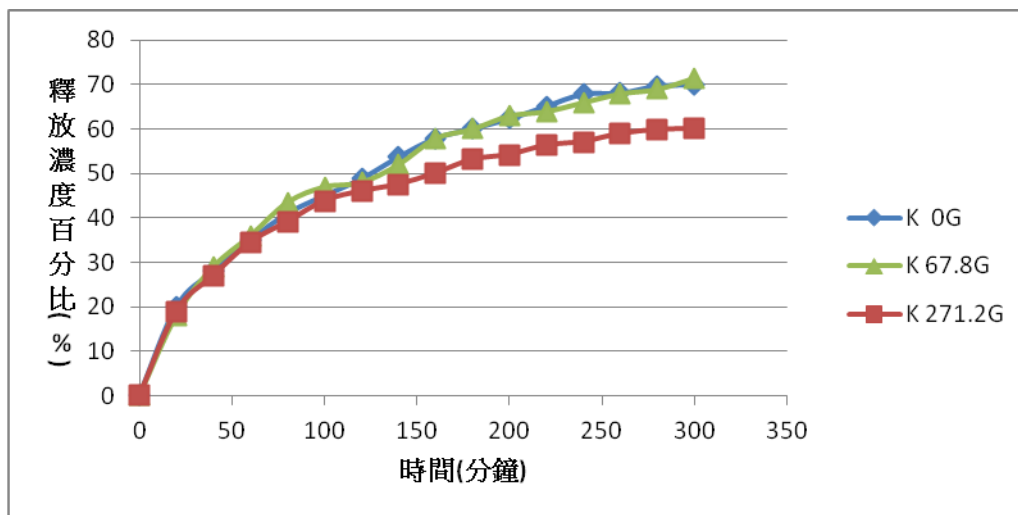
5. 磁場強度對硝酸鈉滲透速率的影響(圖 23)



▲圖 23 結果分析：硝酸鈉滲透速率 $271.2G < 67.8G < 33.9G < 0G$

【實驗八】探討帶電離子的釋放行為

1. 鉀離子的釋放行為(圖 24)



▲圖 24 結果分析：

施加磁場前(0G)，300 分鐘內釋放率約為 70%

施加磁場後(271.2G)，300 分鐘內釋放率降至 60%

【實驗九】第三代凝膠：氧化鐵凝膠

1. 添加不同磁性物質

(1) 加入氯化鐵、氯化亞鐵：(亞鐵離子會氧化成鐵離子)

凝膠情形與硫酸銅、氯化亞鈷相似，鐵離子會與吉利丁的羧基整合形成穩定凝膠，但磁敏感性不顯著。

(2) 加入鐵粉：

鐵粉難溶於水，因此會沉澱於凝膠底部。但若將含鐵粉的凝膠風乾數天後，會發現凝膠中出現棕紅色的鐵離子，甚至出現接近奈米級的黑色氧化鐵。

(3) 加入奈米級氧化鐵：

氧化鐵能均勻分散於吉利丁凝膠中，



◀圖 25：

(左)氧化鐵凝膠外觀

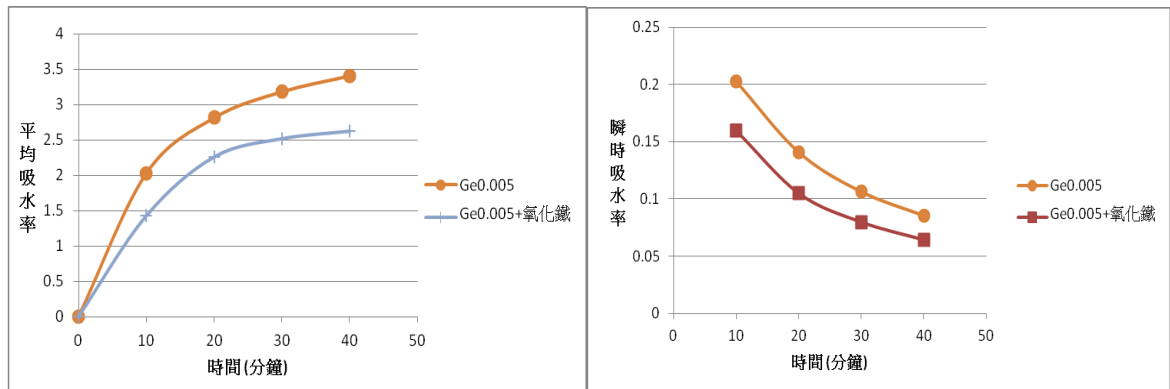
(中)表面分布

(右)顯微照片

2. 「氧化鐵凝膠」與「未添加之凝膠」之吸水性質比較

(1) 平均吸水率

(2) 吸水速率



▲圖 26 結果分析：添加氧化鐵之凝膠其膨潤速率較未添加者低

3. 外加磁場

(1) 氧化鐵凝膠

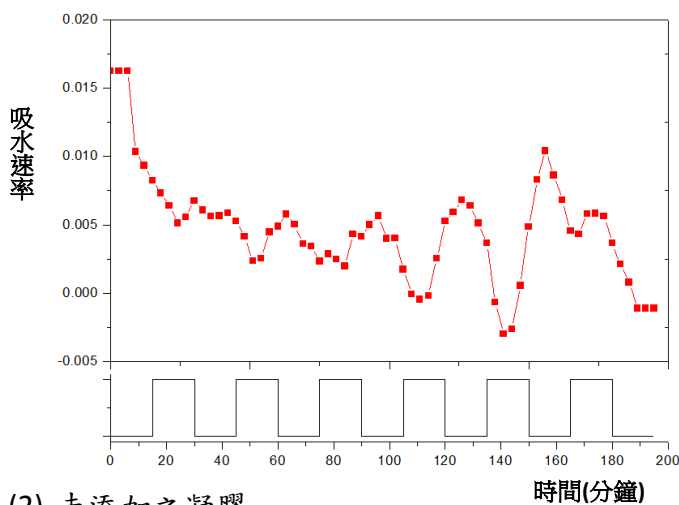


圖 27 結果分析：

在有外加磁場的情況下，氧化鐵凝膠的滲透速率明顯降低，且隨膨潤時間越長，其磁敏感效應越顯著。

(2) 未添加之凝膠

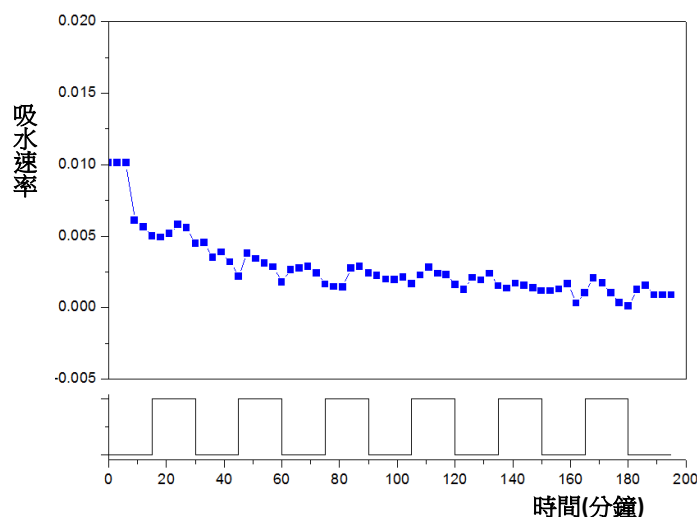


圖 28 結果分析：

未添加氧化鐵之凝膠，在中性環境下，其磁敏感效應並不顯著，外加磁場對其膨潤率影響較小。

柒、討論

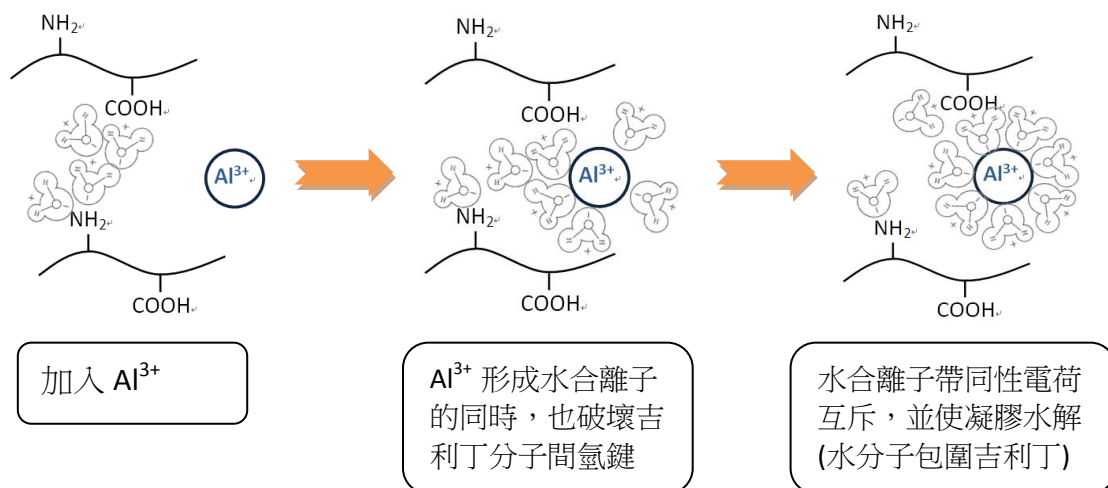
【實驗一】探討凝膠的凝膠結構

(一) 溫度與水對凝膠的影響

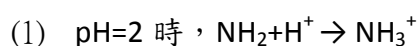
1. 依據實驗結果：當溫度高於 30°C 或缺乏水分時，會使吉利丁無法凝膠，而在低溫有水情況下，無論有無溶解都能凝膠。由於溫度低時，水分子間氫鍵作用力較強，推測凝膠的關鍵應在於氫鍵的形成，而由吉利丁的分子式，也可察覺 $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 多數氫鍵的存在。
2. 配製吉利丁溶液時我感到很疑惑，加熱至 50°C 使吉利丁分子溶解，但溫度降低時溶解度亦降低，為什麼吉利丁不會沉澱析出？如果吉利丁是直接以 $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 的氫鍵為作用力，那應該不會凝膠而是沉澱。但實驗結果卻是凝膠，顯示水分能夠保留在凝膠的結構裡，也就是吉利丁分子間是以水分子的氫鍵為橋梁連接。

(二) 離子與酸鹼值對凝膠的影響

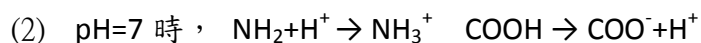
1. 實驗結果顯示：在吉利丁溶液中加入電解質，不僅不會凝聚沉澱，反而會阻礙吉利丁的凝膠。這和高中課本提及的膠體溶液性質，有很大的差異。高中課本：「膠體粒子因帶同性電荷而分散，加入電解質會使電性中和，使膠體溶液凝聚。」我推測在加入電解質時，吉利丁的帶電情況不像課本上寫的電性中和那麼單純。
2. 帶電離子在水溶液中會形成水合離子，與吉利丁分子競爭水分子，其結果導致分子間氫鍵受到水合離子的破壞。其中，以 Al^{3+} 水合能力最強，能形成帶正電的大半徑水合離子，因同性電荷互斥而分散。



3. 討論不同 pH 值溶液中，吉利丁的帶電情形：



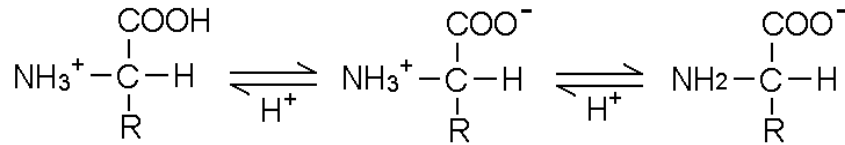
胺基部分會吸附 H^+ ，而形成 $-\text{NH}_3^+$ ；又羧基部分因共同離子效應不易解離，而以 $-\text{COOH}$ 存在，因此整個分子會帶正電，彼此互斥分散。



吉利丁的等電點約為 $\text{pH}=7$ 左右，在中性環境下，胺基酸所帶胺基的正電荷與羧基所帶的負電荷數相等，因此整個分子為電中性

(3) pH=13 時， $\text{COOH} \rightarrow \text{COO}^- + \text{H}^+$

羧基部分會解離 H^+ ，而形成 $-\text{COO}^-$ ；又胺基部分因共同離子效應不易解離，而以 $-\text{NH}_2$ 存在，因此整個分子會帶負電，彼此互斥分散。



▲圖 29：不同酸鹼值環境下，吉利丁的離子化程度

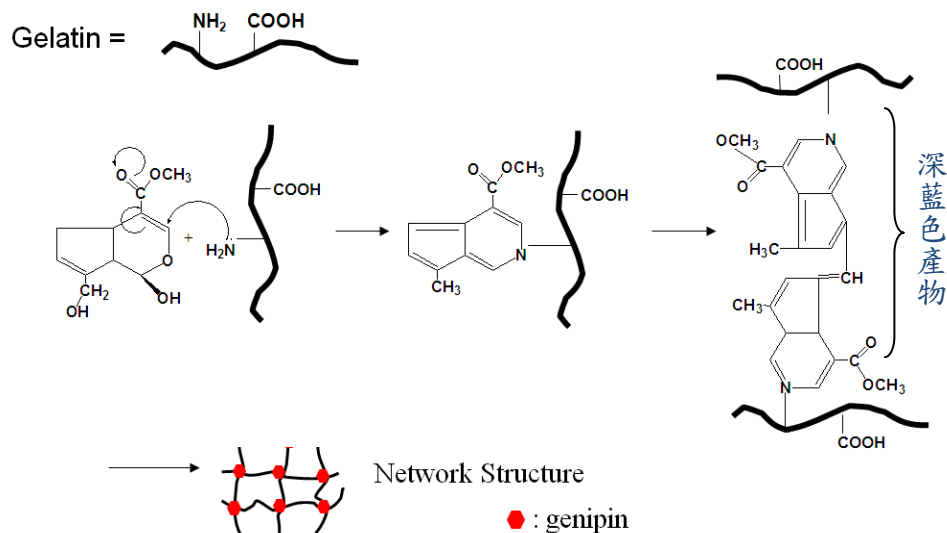
(三) 磁場強度對凝膠的影響

1. 磁場強度小於 33.9G 時，對於凝膠的破壞情形並不明顯；大於 135.6G 的磁場，會使吉利丁無法順利凝膠。
2. 由於凝膠結構是以水分子的氫鍵為橋梁，所以我推測：磁場主要是破壞水分子的氫鍵，且磁場強度越強，破壞的程度也越顯著。

【實驗二】凝膠的穩定性改良

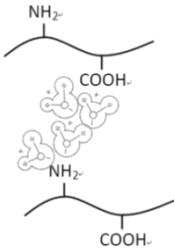
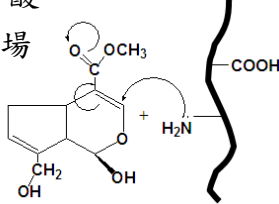
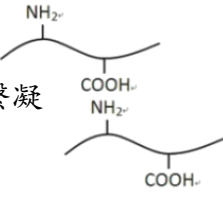
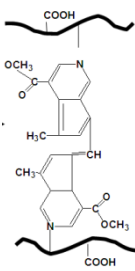

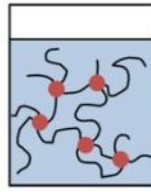
(一) 改良前後比較

1. 「改良前的凝膠」僅以氫鍵維繫膠體結構，易因溫度上升、酸鹼值的變化或外加磁場等，導致凝膠在吸水的過程中水解。為了增加凝膠的穩定性及機械強度，我在吉利丁溶液中加入 Genipin，以化學性交聯取代物理性氫鍵的作用，改良凝膠的缺點。
2. Genipin 是一種天然交聯劑，能交聯吉利丁分子上的胺基，使膠體溶液的高分子鏈互相連接，形成類似「高分子篩網」的結構，Genipin 則扮演篩網中的交聯點，使吉利丁在強酸或強鹼的環境中，仍能自由解離而不致水解，增加結構的穩定度。



▲圖 30：Genipin 與吉利丁的交聯反應機制

3. 交聯前後結構比較：

	第一代凝膠 (改良前)	第二代凝膠 (改良後)
凝膠結構	以水分子的氫鍵為橋樑，易受溫度、酸鹼值、離子與磁場的破壞。 	不易受溫度、酸鹼、離子與磁場等破壞。 
乾膠結構	水分蒸發後，僅以 COOH 和 NH ₂ 間的氫鍵維繫凝膠結構。 	以交聯產物維繫結構，故交聯濃度越高，交聯密度越大，硬度也較高。 
吸水 10 分鐘後	水分持續進入，使分子間距離越來越遠，作用力減弱，最後吉利丁因水合而水解。 	水分持續進入，但仍能維持穩定的結構，不易水解，且可重複吸水再利用。 

4. 改良前的凝膠，對於溫度、酸鹼及磁場變化具高度不穩定性，極易水解，這是凝膠改良前的缺點，但也這正是凝膠改良後的優點。加入交聯劑後，這些「不穩定性」變成凝膠的「敏感性」，使其對於環境變化具高度敏感性而不致水解，能利用外在條件改變其吸水性質。

(二) 不同交聯濃度比較

1. 交聯反應的產物為藍黑色聚合物，因此在交聯過程中，樣品顏色由「黃色→綠色→藍色→靛色」。且 Genipin 濃度越高，終產量越多，顏色較深，樣品透光度也較低。
2. Genipin 濃度越高，交聯密度越大，高分子鏈間的連接較密集，形成孔徑較小的篩網，水分子的擴散速率較慢；Genipin 濃度越低，交聯密度越小，高分子鏈間的連接較疏鬆，形成的篩網孔徑較大，故水分子的擴散速率較快。



(左) 交聯濃度低 (右) 交聯濃度高

3. 在酸性與鹼性環境中，吉利丁的胺基與羧基會解離，淨電斥力使凝膠吸水率增加，但高密度交聯網因受到交聯的限制，所以差異不大，敏感性較低。Genipin 會與胺基進行交聯反應，形成胺基無法解離的高分子鏈，故 Genipin 濃度越高，在酸性環境中能解離的胺基數目也越少，以致「在酸中的吸水率」小於「在鹼中的吸水率」。

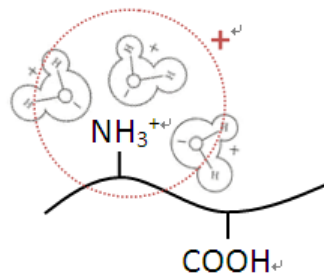
【實驗三】「凝膠膜」的製備

1. 由於 Ge0.005 的敏感性較佳，彈性及韌性良好、容易裁切且不易皺縮。其受交聯網的限制程度亦較小，因此吸水行為差異明顯，故我以 Ge0.005 為交聯濃度，統一製備凝膠膜，做為往後的實驗材料。
2. 做成「凝膠膜」的優點：
 - (1) 製備時可依所需條件改變交聯濃度，進而改變樣品的硬度與彈性。
 - (2) 不只可做成膜狀，亦可做成球狀、柱狀、片狀等，例如製成膠囊狀的凝膠應用於藥物釋放。
 - (3) 相較於天然膜(例如：蛋膜)，凝膠膜具有更高的穩定性與再現性，能減小實驗誤差。在吸水率實驗中我每組實驗重複三次，
 - (4) 相較於其他人造膜(例如：保鮮膜)，凝膠膜具有更高的生物相容性，且會隨時間逐漸增大孔徑
 - (5) 相較於其他吸水性聚合物(例如：聚丙烯酸)，凝膠膜的吸水率較低，且具高敏感性，能夠調控溶質的滲透與釋放，而不會瞬間大量釋放以致溶質流失。

【實驗四】酸鹼值對凝膠吸水率的影響

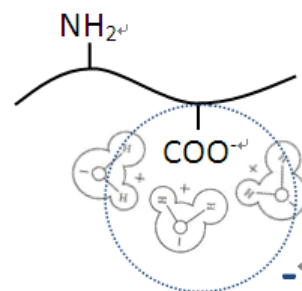
1. 凝膠吸水曲線：

吸水率在吸水初期急遽上升；而到吸水的中期，吸水速率比前期緩慢許多，隨著時間增加，吸水速率逐漸趨緩，最後達到平衡。
2. 凝膠吸水行為：
 - (1) 如果只是單純離子基間的互斥，並不會造成持續的吸水效應。而且在當水分子持續擴散、凝膠持續吸水時，離子基間的距離會逐漸增加，使電荷斥力減少。從另一個角度思考，中性環境下分子淨電荷為零，電荷斥力抵消，吸水率也應趨近於零，實則不然。
 - (2) 解離的離子基會吸引極性水分子，形成龐大的「水合離子團」，以鹼性環境為例：羧基 COOH 解離形成 COO^- ，而 COO^- 會吸引水分子的氫端，形成一個外圍帶負電的水合離子團。這種水合離子造成的「電荷放大效應」，使得凝膠的吸水率顯著地增加，並持續地吸水。吸水過程中，水合離子團的半徑逐漸增加，使電荷間保持小距離。



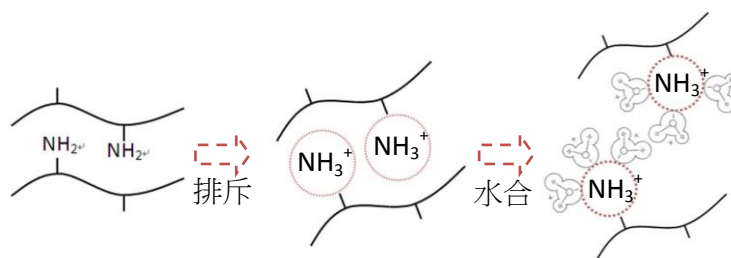
▲ 酸性環性下的水合情形

▼ 鹼性環性下的水合情形



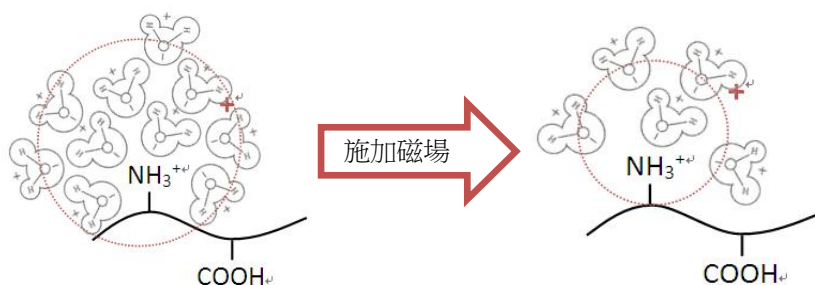
3. 凝膠吸水過程：

水分子擴散→離子基解離→同電荷斥力→凝膠結構膨潤→水分子持續擴散→電荷持續水合→凝膠持續吸水→更多水分子的擴散



【實驗五】磁場強度對凝膠吸水率的影響

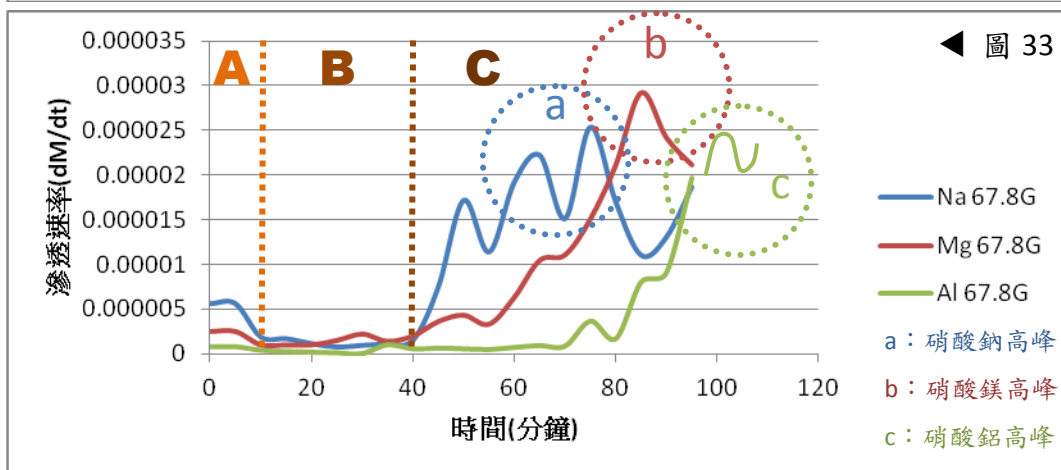
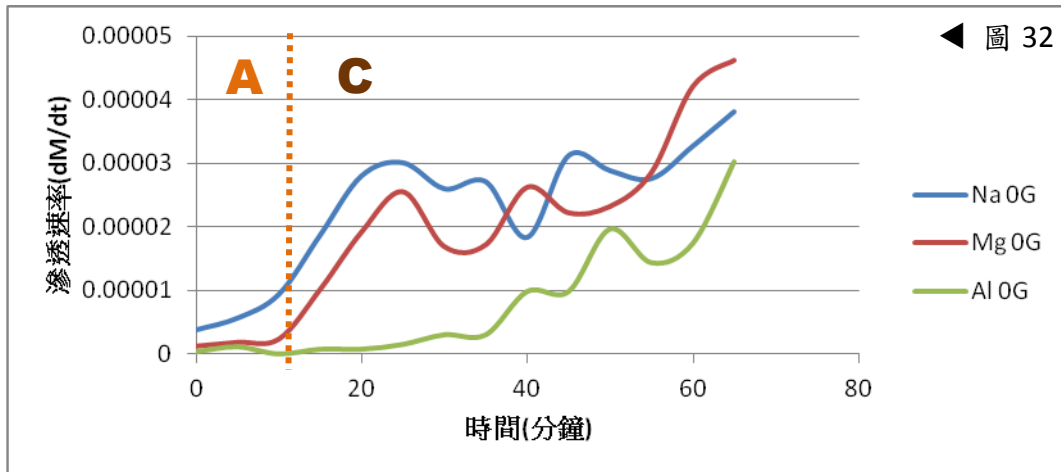
1. 施以外加磁場後，凝膠平均吸水速率竟然降低了！對於這個有趣的發現，我重覆進行實驗，發現凝膠在不同酸鹼值之下，皆有吸水率降低的現象。且在強酸和強鹼環境中的降低幅度，較中性環境明顯。此與吉利丁離子化的趨勢相同，推測磁場的影響程度和吉利丁的水合離子團有關。
2. 在第 45 屆科展「磁場對蛋膜滲透壓的影響」參考資料一中，作者發現磁場能使離子對蛋膜的滲透壓增加；第 49 屆科展「膜粒通道」參考資料二以 N 極會吸引陰離子、S 極會吸引陽離子的假說進行討論。由此推想，吉利丁分子在酸中為陽離子型態，在鹼中為陰離子型態，在 pH=7 雖為電中性，但仍具有 NH_3^+ 和 COO^- 的離子基，磁場對其影響程度卻極小，因此此假設與實驗結果不符。
3. 回想凝膠在不同 pH 值的吸水行為，其吸水率差異的主因並非離子數多寡，而是同電荷斥力，且藉由水合離子團擴大斥力。吸水率減小的關鍵，應在於電荷斥力的降低，但磁場是如何導致電斥力減小的呢？
4. 在第 49 屆物理科展「磁場對水表面張力之影響」參考資料三中，發現磁化水的沸點約為 75°C ，且水滴接觸角由 60° 降至 45° ，水分子間的作用力較未磁化水弱，以實驗證明磁場對氫鍵的破壞作用。而在【實驗一】中，從磁場對凝膠的影響，證明磁場對氫鍵的破壞。
5. 推測磁場可能藉由破壞水分子間的氫鍵，使吉利丁離子基的水合能力降低，進而使水合離子團的半徑縮小，導致吉利丁分子間的排斥力減弱。少了水合離子的「電荷放大效應」，吉利丁分子間的電荷斥力減少，導致凝膠的吸水速率減緩。



▲圖 31：磁場使水合離子團半徑減小

【實驗六、七】帶電離子的滲透行為(縣市賽後改良)

- 離子與吉利丁上的離子基，兩者皆帶有電荷，兩者皆有形成水合離子團，當離子穿過布丁膜時，滲透與吸水行為又會如何交互作用？為了使實驗單純化，我們以中性純水為溶劑，不探討酸鹼環境的原因有二：
 - 酸鹼為強電解質，導電度趨近無限大，無法使用導電度計測量離子的滲透情形。
 - 在酸鹼環境下，吉利丁會離子化，使離子的滲透行為更形複雜。
- 帶電離子通過布丁的滲透速率曲線(圖 32：未施加磁場；圖 33：施加磁場)

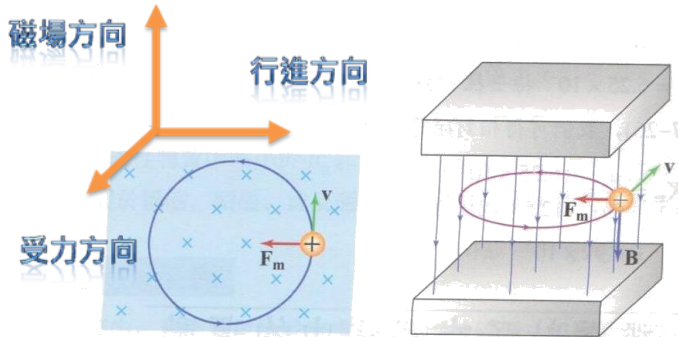


- A 段：布丁相當於通道的閘門，此時閘門尚未完全開啟，部分離子通過，部分離子滯留，因此滲透速率緩慢。有趣的是，外加磁場卻會使 A 段略為增速！
- B 段：施加磁場後，滲透速率曲線出現 B 段的低速期。推測磁場可能會使離子較不易通過閘門，增強離子與布丁膜的交互作用。
- C 段：施加磁場前，C 段速率呈現漸次升高的情形；施加磁場後，C 段曲線會出現「滲透速率高峰」，且不同離子的高峰出現時間不同。推測此時閘門已經完全開啟，離子通行無阻、自由擴散，最後漸趨平衡。
- 為了解釋離子的滲透曲線變化，以下針對磁場的可能效應進行討論：
 - 磁場可能使離子運動方向偏轉
 - 磁場可能會影響布丁膜對離子的吸附能力
 - 磁場可能會改變布丁膜的孔徑大小
 - 磁場可能會影響離子與離子基的水合能力

【討論實驗 1】

1. 想法：磁場會使離子做螺旋運動而減速
2. 模型 1：

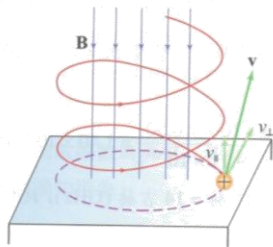
依據右手開掌定則，帶電質點 q 在磁場 B 中以速度 v 運動時，所受磁力大小 $F = qvB \sin \theta$ ，且速度、磁場與偏轉方向三者垂直。



磁場 B 會造成一偏向力 F ，使質點做半徑為 r 的等速圓周運動。

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad r = \frac{mv}{qB}$$

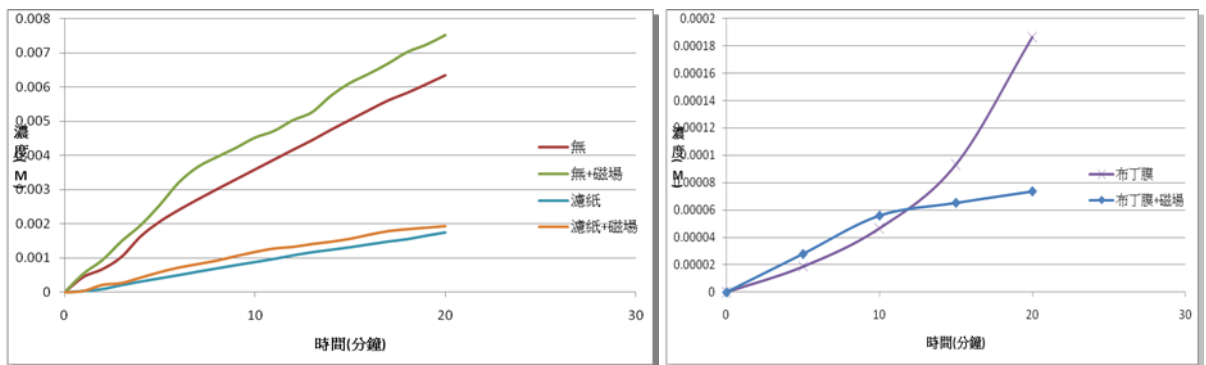
由於磁力必垂直於質點速度的方向，因此磁力不能對帶電粒子做功，質點速度不變，但因做圓周運動而使路徑增長，耗費時間。



如果帶電粒子進入磁場的速度 v 並不與 B 垂直，令 $V_{//}$ 表與 B 平行的速度分量， V_{\perp} 表與 B 垂直的速度分量。如圖所示，垂直分量 V_{\perp} 會造成一大小為 $qV_{\perp}B$ 的偏向力，然而 $V_{//}$ 並未受到影響。因此，此帶電質點的運動路徑，會形成左圖的螺旋線。

3. 實驗 1-A：

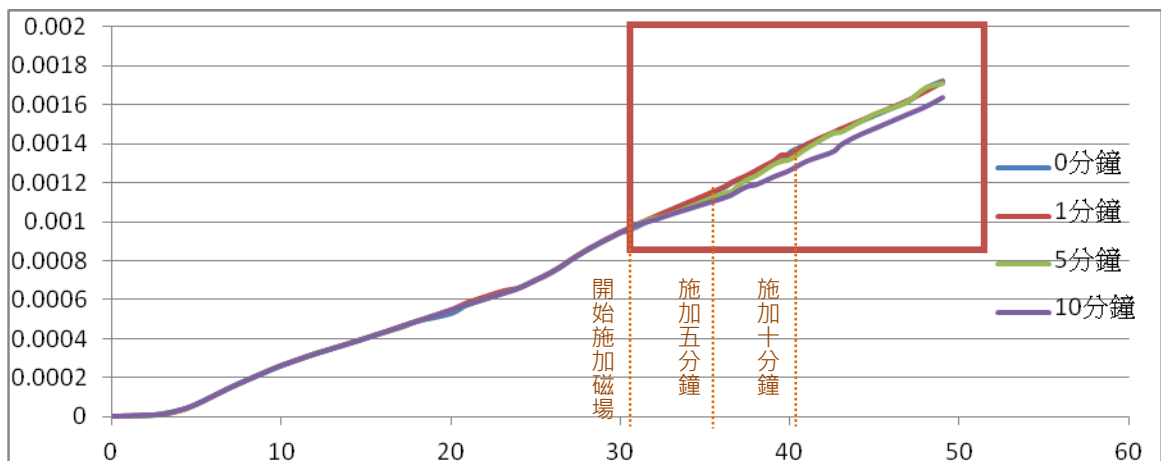
比較無滲透膜、濾紙(不帶電)及布丁膜(帶電)時，離子在施加磁場前後的滲透曲線



4. 實驗 1-B：

以布丁為滲透膜，探討磁場作用時間對滲透曲線的影響

我們於開始滲透後 30 分鐘起，施以不同的磁場作用時間，測量其導電度變化。



5. 結果與討論：

- (1) 在無滲透膜的情況下，磁場會使離子運動明顯**加速**；以濾紙(不帶電)為滲透膜，磁場也有使離子**加速**的情形。只有以布丁(帶電)為滲透膜時，才會產生明顯的**滯留期**，推測**滲透膜上的電荷是造成滯留現象的主因**。
- (2) 實驗 1-B 結果顯示：磁場效應需要**一定的作用時間**，且當去除磁場時，仍能維持一定時間的滯留效果。然而，依據模型 1，瞬間磁場 B 對離子 qv 亦可形成一偏向力 F，且當 B 去除時，此 F 即消失。由以上實驗結果，顯示離子的偏轉並非滯留的主因。

【討論實驗-2】

1. 想法：磁場會改變布丁膜的吸附能力
2. 模型 2：

由實驗-1 得知：滲透膜上的電荷是造成離子滯留的主因。我們推測：布丁膜上的離子基解離後，與通過離子間具有庫倫靜電力，會使陽離子的速度方向偏向 COO^- ，磁場可能會對此速度造成一偏向力，進而影響布丁膜對離子的吸附能力。

3. 實驗 2：

- i. 取 0.17g 的硝酸鈉溶於 20ml 的水中。
- ii. 將布丁膜置入硝酸鈉水溶液中，並施以不同強度的外加磁場。
- iii. 吸附 10 分鐘後取出。再將剩餘溶液蒸乾，測量硝酸鈉之剩餘克數。

磁場強度(G)	0	33.9	67.8	217.2
剩餘克數(g)	0.135	0.140	0.137	0.133
吸附量估計(g)	0.035	0.030	0.033	0.037

4. 結果與討論：

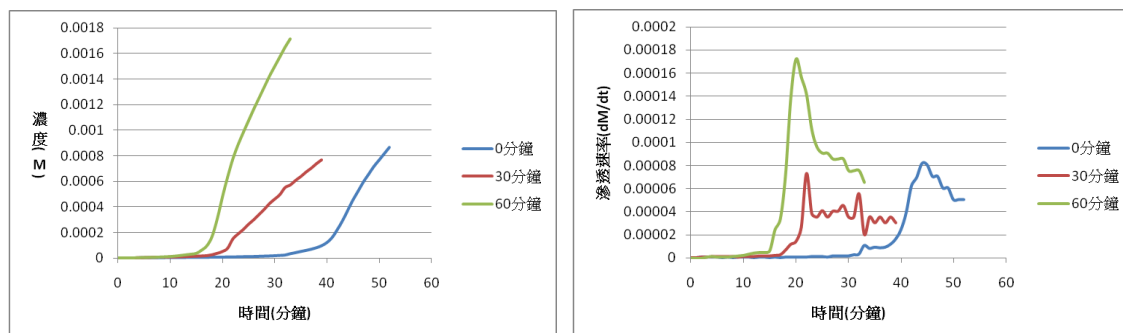
磁場強度對布丁的吸附力影響不顯著，顯示磁場並不會使離子偏向或偏離離子基。

【討論實驗-3】

1. 想法：磁場會影響布丁膜的孔徑大小
2. 模型 3：

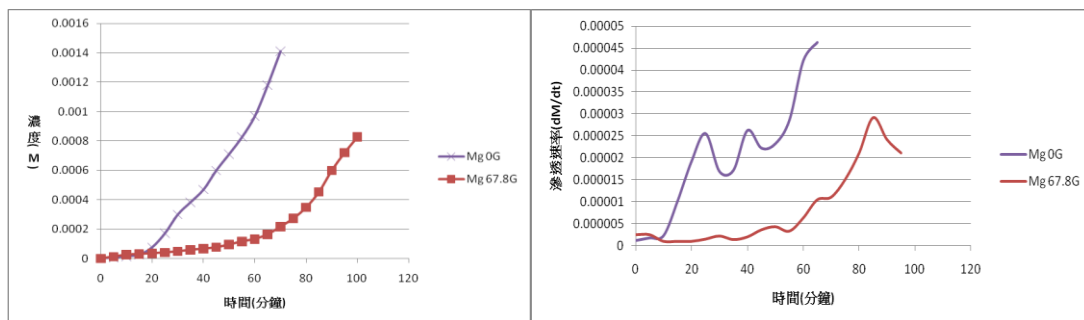
上述實驗結果顯示：離子在磁場中運動仍能保持向前的分量，其受偏向力的影響並不顯著。推測磁場可能藉由改變布丁膜的孔徑大小，使離子與離子基間距離減小、靜電力增加，進而造成滯留。

3. 實驗 3：以 Ge0.005 為滲透膜，分別先膨潤 0 分鐘、30 分鐘、60 分鐘再進行測試。



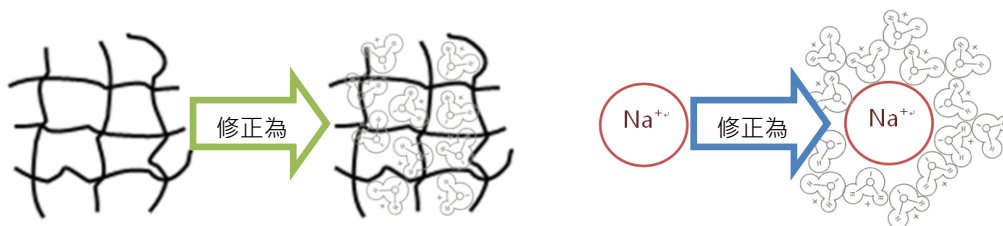
4. 討論：

- (1) 我們實際測量不同孔徑的布丁膜，將其滲透曲線與磁場效應比較。由圖 38 中可知：膨潤時間越長，孔徑越大，離子越容易通過，因而滯留時間較短。
- (2) 我們將圖 38 與圖 39 比較，發現兩者曲線相似度極高。但當我們將其轉換成滲透速率時，發現有兩處不相同：① 施加磁場後的初始滲透速率較施加磁場前大 ② 圖 38 中呈現平緩→高峰→振盪的曲線；圖 39 中則為漸次攀向高峰。



▲ 圖 34：外加磁場對滲透曲線的影響

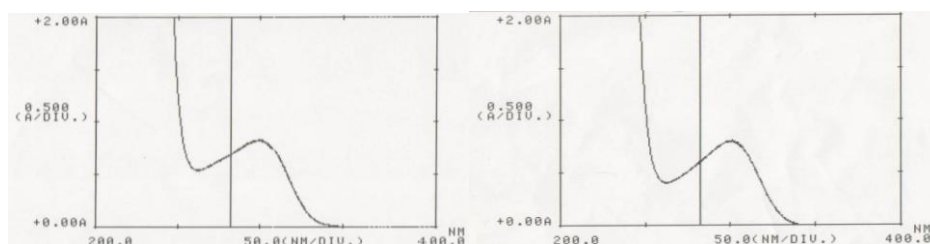
- (3) 此外，離子的實際半徑遠較布丁孔徑小，即使布丁孔徑有較顯著的改變，對離子的滲透曲線影響理應不明顯。於是我們進一步思考：離子與離子基在水溶液中皆會水合，形成龐大的水合離子團，因此布丁的孔徑不單只是純粹的篩網結構，而應為由篩網與水分子氫鍵形成的「水籠結構」，因此，我們發展出模型 4。



【討論實驗-4】

1. 想法：磁場會影響離子與布丁膜上離子基的水合能力
2. 實驗 4-A：磁場對水合離子半徑的影響
 - a. 將 0.1M 的硝酸鈉溶液置於不同磁場強度的線圈中，20 分鐘後取出
 - b. 以 UV-vis 光譜儀檢測其吸收度曲線

磁場強度(G)	0	33.9	67.8	217.2
300nm 吸收度	0.814	0.809	0.807	0.801



▲ 圖 41：施加磁場前(左)、後(右)的吸收度曲線

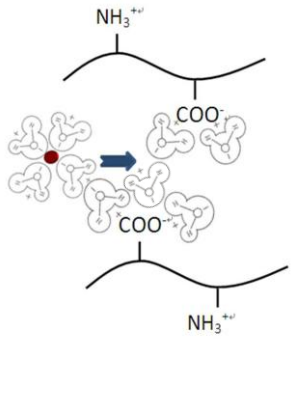
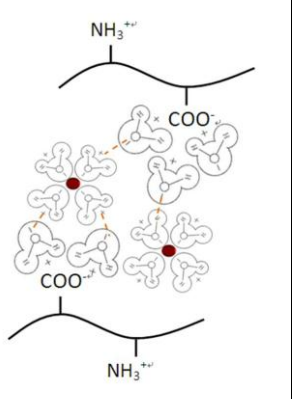
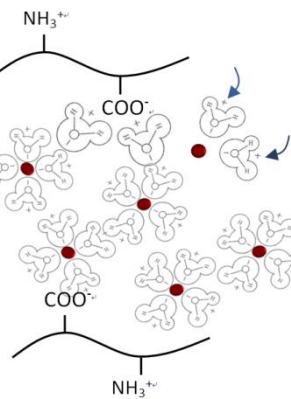
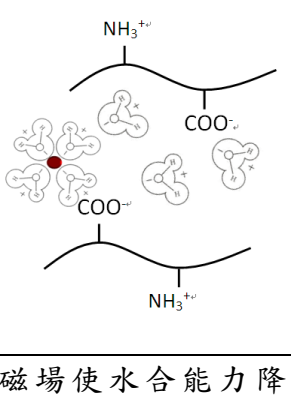
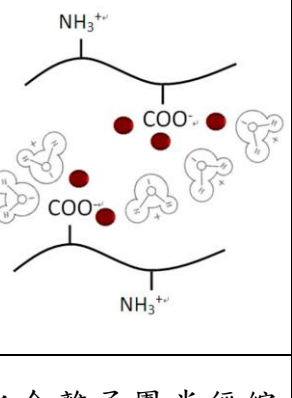
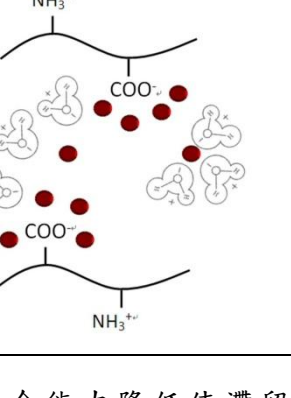
4. 實驗 4-B：磁場對布丁水合能的影響(進行中)

- 以微卡計測量布丁在吸水時的溫度變化
- 施以不同強度的外加磁場，再以微卡計測量其在不同磁場強度下的「吸水焔」

5. 討論：

- 水合離子團半徑越大，截面積越大，吸收度也越大。實驗結果顯示：磁場強度越強，硝酸鈉水溶液吸收度有降低的趨勢，顯示磁場能使水合半徑減小。
- 由水合觀點解釋實驗 1-A：磁場使水合半徑降低，離子運動因而加速，但當離子通過帶電的布丁膜時，因與離子基間的距離降低，使其受較強的庫倫靜電力吸引而發生滯留。

6. 模型 4：(最終模型)

	A 段：離子進入	B 段：離子滯留	C 段：以水合形式離開
磁場關閉			
	水合離子擴散通過布丁，此時水籠結構會對離子擴散造成阻礙	水合離子與布丁的離子團間有水分子阻礙，滯留現象不明顯	布丁持續膨潤，水分子擴散進入，帶走滯留的離子
磁場開啟			
	磁場使水合能力降低，離子水合半徑減小，且水籠結構瓦解，故滲透速率加速	水合離子團半徑縮小，陽離子直接與羧基作用，吸引力增強	水合能力降低使滯留時間增長，水分子不易帶走滯留離子

【實驗八、九】磁敏感性凝膠的膨潤與釋放

1. 添加磁性粒子對凝膠的影響

由【實驗一】得知：吉利丁上的羧基能與重金屬離子螯合。如果利用羧基的螯合特性，包覆其他物質於凝膠中，或許能使凝膠產生更特殊的性質。於是我嘗試在凝膠中包覆銅離子、鈷離子、鐵離子等，進行滲透與釋放實驗，卻發現離子的滲透與釋放速率反而大為減緩，且磁敏感性不顯著。

2. 由文獻中得知：吉利丁與氧化鐵的作用力相當良好，能均勻而完整地包覆於氧化鐵奈米粒子的表面，而氧化鐵本身更是一種良好的磁性材料，不僅能增加凝膠的磁敏感性，更能藉由相互間之磁力形成更穩定的交聯結構。

3. 相較於同交聯密度者，加入氧化鐵後的凝膠膨潤速率會下降，顯示氧化鐵粒子間的磁性作用除了會限制平衡膨潤率外，也會影響膨潤的速度。

4. 在第一次開啟磁場時，凝膠的膨潤速率未受到明顯影響，隨著凝膠逐漸吸水，可以發現當磁場開啟時，膨潤速率會有下降的情形，且下降幅度更為明顯。而膨潤程度關係著凝膠的軟硬度，當凝膠膨潤時間越久，其內部之高分子練段會較為柔軟，磁敏感性也較顯著。

5. 「氧化鐵凝膠」解決了「第二代凝膠」在中性中吸水率低的問題，而且包攬溶質不限於帶電離子，可利用外加磁場調控非帶電的分子的釋放，具有更廣泛的應用價值。下一步我將針對「氧化鐵凝膠」進行投藥測試（例如：維生素 B），先利用分光光度計進行濃度-吸收度曲線之定量，再測定外加磁場對其藥物釋放速率之影響，期望能善用磁場這種「超距力」，遙控溶質的滲透與釋放！

捌、結論

一、凝膠以水分子的氫鍵為橋樑，故結構鬆散且易水解。溫度大於攝氏 30 度或磁場大於 135.6 高斯，會使氫鍵作用力減弱，無法形成凝膠。

二、帶電離子在水溶液中易水合，與吉利丁爭奪水分子的結果會導致氫鍵的瓦解，其中以 Al^{3+} 水合能力較強，對凝膠的破壞較顯著。

三、吉利丁在不同 pH 值的溶液中，離子化的程度不同。在強酸或強鹼的環境下，解離的離子基因帶同性電荷而互斥，並藉由水合離子團擴大斥力，最後導致凝膠的水解。

四、利用 Genipin 交聯處理吉利丁，可使凝膠的機械強度增加，且在吸水的過程中不易水解。Genipin 濃度越高，顏色越深，硬度越大，吸水率及敏感性也較低。

五、Ge0.005 具有良好的彈性與韌性，對於環境變化具高敏感性，且在製備的過程中不易皺縮，可以減小實驗誤差，故我選擇以 Ge0.005 做為最佳交聯濃度。

六、在中性環境下，凝膠的吸水率較低；在酸性與鹼性的環境中，其吸水率較高。磁場強度越強，凝膠的吸水率有降低的趨勢，顯示磁場能破壞水分子間的氫鍵，且須一定的磁場強度與磁化時間。

- 七、帶電離子通過凝膠的滲透曲線普遍具有「滯留期 (A 段)」，且電荷數越多，與吉利丁上離子基的作用力越強，滯留時間也越長。
- 八、外加磁場會破壞水分子間的氫鍵，使離子無法以水合形式擴散離開，進而延長滯留時間，使整體滲透速率減慢。外加磁場也會降低離子的釋放速率，使帶電離子產生滯留現象。
- 九、利用外加磁場調控凝膠的吸水行為，可以進而改變離子的滲透與釋放速率。由於磁場屬於一種超距力，故可由外在環境「遙控」凝膠的吸水行為，具有相當廣泛的應用價值。本研究未來將針對凝膠的磁場效應發展應用，預計會在凝膠中包覆溶質，利用磁場的開關來「遙控」溶質的釋放！

玖、未來展望

- 一、本實驗針對吉利丁的吸水行為進行探討，實驗發現凝膠的吸水對於環境變化具高敏感性，可以利用交聯濃度的不同去改變凝膠的結構與性質，亦可利用酸鹼值與磁場的改變調控凝膠的吸水率。
- 二、由於凝膠具有「可調控」的膨潤性質、高通透性與高生物相容性，因此，我想到在凝膠中包覆溶質，將「遙控凝膠」實際應用於生活中，試舉幾例如下：
 - 1. 肥料施放：
在凝膠中包覆肥料或植物激素，因應植物生長的需求，改變土壤酸鹼值與磁場的變化，進而調控肥料的施放，且肥料較不易流失，能較節省資源。
 - 2. 保濕面膜、磁控貼布、磁控 OK 蹦：
在凝膠中包覆左旋 C、維生素、酸痛紓解物或跌打損傷藥，利用酸鹼值與磁場的調控，達到特定區域釋放的目的。
 - 3. 藥物膠囊：
以凝膠為藥物載體，利用身體本身酸鹼值的變化(例如：消化系統)，或是施加外在磁場(例如：核磁共振)，使藥物能於特定部位、特定區域釋放，不致提早流失浪費，增加藥物釋放的效率與精確性。
 - 4. 細胞培養：
膠原蛋白(Gelatin)本身為良好的生醫組織材料，常應用於幹細胞培養與組織工程上，若再結合凝膠的敏感性，配合細胞週期控制藥物釋放，應能達到最佳的培養效果。

拾、參考資料

- 1. 陳羿如等。第 45 屆科學展覽會高中組化學科第二名。蛋求滲解—磁場對蛋膜滲透壓的影響。取自：<http://www.tyc.edu.tw/files/CD/science45/senior/0402/040213.pdf>
- 2. 李馥安等。第 49 屆科學展覽會高中組化學科第一名。膜粒通道—蛋膜粒子通道速率之研究。取自：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/040213.pdf>

3. 黃靖瑜等。第 49 屆科學展覽會國中組物理科最佳創意獎。正正有磁—磁場對水表面張力之影響。取自：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/030104.pdf>
4. 劉家媛等。胺基酸的性質。取自：
<http://www.excellence.fju.edu.tw/plan/2.1.1.c/content05/html/30.htm>
5. 蔡承致（民 89）。由中藥梔子果實裡萃取純化天然交聯劑 Genipin 及其在生醫材料上的應用。國立中央大學化學工程研究所博士論文，已出版。
6. 梁崇正（民 91）明膠的溶膠-凝膠相變化與微乳液-有機凝膠相變化。國立中央大學化學工程與材料工程研究所碩士論文，已出版。
7. 鮑爾（民 92）。現代化學 II。臺北市：天下遠見。
8. 魏明通（民 96）。普通化學實驗。臺北市：五南。