

MC-Transaction on Biotechnology, 2014, Vol. 6, No. 1, e3

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

糖水溶液黏度量測的熱力學觀點

曹智萍、林佩萱、陳良宇*

銘傳大學 健康科技學院 生物科技學系 (中華民國 台灣 桃園)

中文摘要

評估水溶液中的糖濃度是食品科學與生醫診斷中很重要的指標。本研究是針對應用生物技術的大學生所開發的實驗課程單元，藉由量測不同濃度與溫度條件下糖水溶液的黏度與密度，來評估影響生物流體的主要因子與流變特性。運用奧士瓦黏度計評估濃度與溫度對此黏度量測技術的影響，結合理論公式以說明實驗結果之物理原則，強化基礎科學的應用，提升傳統品管技術的精確性。以安德雷德的黏-溫公式得到蔗糖水溶液之平均活化能約為 18.53 kJ/mol。

關鍵字：流動性、流體動力學、哈根-卜瓦醉方程式、阿瑞尼溫模式

通訊作者：陳良宇 [loknath@mail.mcu.edu.tw]

收稿：2014-3-26 修改：2014-4-4 接受：2014-4-4 線上發表：2014-4-15

前 言

黏度是一切流體（液體、氣體）都具有的一種物理性質，流動時會因為分子本身的摩擦力而產生阻力，阻力的大小稱為流體的黏度。黏度(viscosity)是影響液態食品風味的重要指標，而食品中也常添加糖分以提升甜味與黏稠的口感，如此一來卻會影響到整個食品加工程序的複雜性與能量輸出，因此糖度與黏度的控管對食品工業而言，是非常重要的議題^[1,2,3]。

因此，本研究是藉由測量糖水溶液的黏度與密度，探討在不同溶質、濃度與溫度條件組成下，評估影響生物流體（如：血液^[4,5,6]、乳汁、發酵液^[7]及糖漿^[8]）的主要因子與流變(rheology)特性。

在日常生活方面，楓糖漿與蜂蜜都是濃稠的，具有較高的黏度；油的黏度也很高且不易流動。而水是稀薄且流動的，具有較低的黏度。簡而言之，流體的黏度越低，流動性越佳。黏度是流體受到剪應力變形或拉伸應力時所產生的阻力，主要

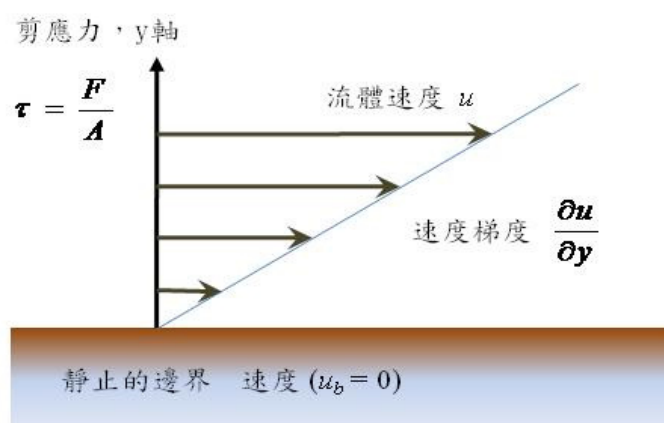
來自液體分子間的相互吸引力，又稱為黏滯性，黏度會因為物質的種類、濃度、溫度等改變^[9]。高黏度可穩定膠體溶液的分散性，降低乳化溶液相分離的風險，進而提高產品的品質。在最近的研究中發現，當糖溶液之黏度超過1.5~1.6 cP時，將降低蜜蜂及食蜜昆蟲攝食花蜜的吸液效率，而溫暖與不黏的花蜜比糖濃度更受蜜蜂青睞^[10,11]。

牛頓流體之黏度數理模型建構：

剪切應力與液體流動速率的關係曲線稱為流動曲線，若是一條通過原點的直線，與速率無關的直線斜率又稱為牛頓流體的黏度。不同斜率代表不同黏度的流體，遵守牛頓黏流定律(Newton's law of viscous flow)，即：

$$\tau = \frac{F}{A} = -\eta \left(\frac{du}{dy} \right) \text{ 或 } F = -\eta A \left(\frac{du}{dy} \right)$$

τ 為單位面積的阻力， η 為黏度係數(viscosity coefficient)，是測量流體黏度的絕對標準。假想流體在流動過程中是分層的，從下層至上層為y方向，距離為dy，運動方向為x，每一平面的面積為A。若只對上平面施以F力，以一定速度u沿x方向流動，靜止不動的下層對上層的流動就會產生阻力，使得上往下沿y軸的速度逐漸變小，形成速度梯度，如圖一所示。



圖一、牛頓流體之二維層流模型

按照國際單位制(SI)，黏度單位為 $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但一般更常用 cgs 制的泊 (poise, $\text{P} = \text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) 作為黏度單位，以紀念法國物理學家卜瓦醉(Poiseuille)。百分之一的量度，又稱為釐泊(cP)，因此， $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$ 。

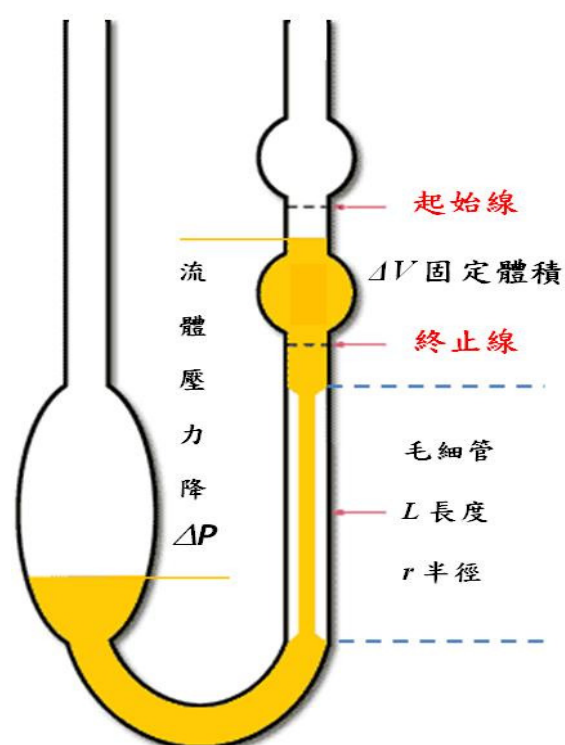
在流體動力學中，哈根-卜瓦醉方程式(Hagen-Poiseuille equation)是描述不可壓縮的牛頓流體流經長圓管時產生壓降 ΔP 之物理定律：

$$\Delta P = \frac{8\eta L Q}{\pi r^4} \text{ 或 } \eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 L Q}$$

ΔP 為兩端的壓力差、 η 是流體的動黏度、 L 是管線的長度、 r 是管線的半徑、 Q 是體積流速($Q=\Delta V/\Delta t$)。若管線之幾何參數固定，則哈根-卜瓦醉方程式可簡化成 $\eta = C \cdot \rho \cdot \Delta t$ ， C 為固定之綜合物理常數。

實驗操作

奧士瓦黏度計(Ostwald viscometer)依據哈根-卜瓦醉方程式的原理所設計^[12]，為帶有兩個球泡的 U 形玻璃管：測定一定容積 ΔV 的液體，流經一定長度及半徑的毛細管，所需要的時間為 Δt ，如圖二所示。



分別量測定量之標準參考溶液及待測樣品溶液流經起始線至終止線所需之時間差 Δt 。

本實驗中使用純水做為標準參考液，其黏度與密度分別為 η_0 與 ρ_0 ，流動時間為 Δt_0 。若待測液體之密度為 ρ 、流動時間為 Δt ，則其絕對黏度 η 可透過以下公式求得：

$$\eta = \eta_0(\text{H}_2\text{O}) \times \eta_r = \eta_0(\text{H}_2\text{O}) \times \frac{\rho t}{\rho_0 t_0}$$

圖二：奧士瓦黏度計之外觀與量測說明

根據上述毛細管測量黏度原理所設計之黏度測量裝置，藉由對比已知絕對黏度的標準參考液的時間差，來求得絕對或相對黏度 η_r 。

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho \Delta t}{\rho_0 \Delta t_0} = \eta_r$$

務必要注意的是確保管壁清洗乾淨，避免溶液殘留及管線阻塞，而測試溶液濃度應由低濃度至高濃度，降低高濃度溶質析出而污染後續量測的機會。

預先準備潔淨乾燥之 100 mL 定量瓶，並記錄空瓶之重量，以作為溶液密度計算之所需。精秤脫色之純化蔗糖約 5 g、10 g、15 g、20 g 分別置入 100 mL 的定量

瓶中，傾入約 80 mL 的去離子水混合溶解直至無顆粒狀糖，再注入去離子水至標線，配製重量體積濃度(w/v)分別為 5%、10%、15%、20%的蔗糖水溶液。

取 4 mL 待測溶液於潔淨黏度計之大球體中(約球體的一半)，設定水浴槽為 15°C 後，將黏度計置於恆溫水槽中約 3~5 分鐘。確保系統溫度達到平衡後，將安全吸球裝在較細的管子上，吸取溶液至超過起始線約 5 mm，拔掉安全吸球，液體開始滑落，紀錄液面通過起始線到終止線的時間，重複同樣的量測步驟十次。

將使用過的黏度計清洗乾淨，風乾或用吹風機吹乾，以保持管內的乾燥，接下來依序測試 10%、15%、20%的蔗糖水溶液。而水浴槽的溫度設定也分別由 15°C 上升至 20°C 及 25°C，以評估溫度的影響效應。

結果與討論

量測標準參考溶液的在操作溫度下通過毛細管的時間，紀錄如表一，平均時間差後方括弧內的數字為 10 次量測標準偏差，相對偏差約 1%左右。溫度上升，純水的密度下降，平均時間差縮短，黏度下降，表示高溫下牛頓流體之流動性變佳，與日常生活之經驗相符合。

表一：標準參考溶液(去離子水)的密度及絕對黏度(理論值)。

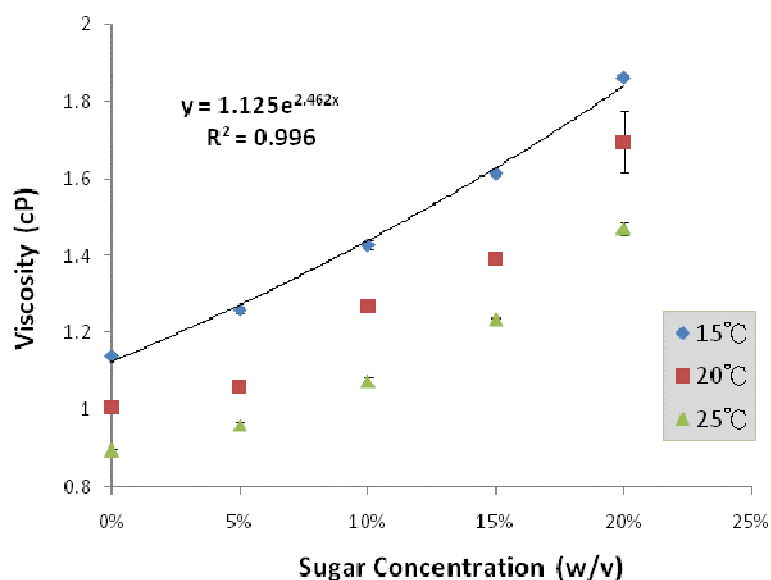
溫度	密度(ρ_0)	時間差(Δt_0)	絕對黏度(η_0)	幾何常數(C)
15°C	0.999127	113.6 (0.516)	1.1404	0.01005
20°C	0.998234	103.2 (1.135)	1.0050	0.00976
25°C	0.997077	96.0 (0.816)	0.8937	0.00934

簡化之哈根-卜瓦醉方程式： $\eta = C \cdot \rho \cdot \Delta t$ ，幾何常數 C 隨著溫度升高而下降，但變化幅度小於平均時間差的變化，主要是本研究設備之玻璃材質於實驗溫度範圍內的膨脹係數不高，不易影響黏度量測的幾何效應。

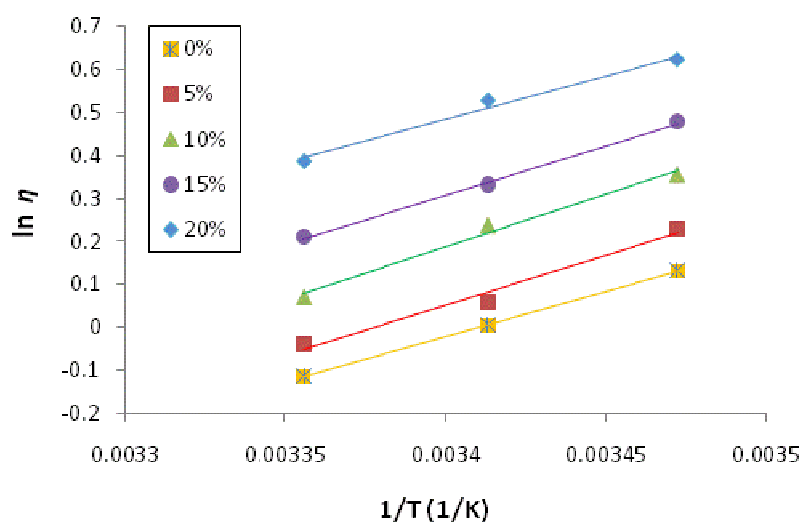
以上述標準參考溶液的黏度為基礎計算，可得在不同溫度下，糖水溶液之濃度與黏度變化關聯性，呈現於圖三，誤差線為三倍之標準偏差。在相對高溫(25 °C)及低溫(15 °C)的情況下，隨著蔗糖濃度[S]的增高，糖水溶液的黏稠性也加大，並顯示指數上升之良好線性相關。

$$\eta[S] = \eta_0 \cdot e^{k \cdot [S]}$$

然而，在 20 °C 的環境下，蔗糖水溶液的黏度關聯性較差，且高濃度 20% 蔗糖溶液的量測變異較大，應該是高濃度的糖水溶液在低溫時呈現玻璃態（部分聚集的糖分子懸浮於水中），而在高溫時呈現液態（糖分子均勻分散於水中），升溫使其流動性突然增大，造成相轉變過程中所導致的介穩(meta-stable)現象。延伸來說，更高溫處理糖漿(sugar syrup)時，若給予攪拌可能會造成局部結晶(sugar crystallization)的生成，以及口感改變的現象。



圖三、不同溫度下糖水溶液之濃度與黏度關聯性。



圖四、溫度效應對糖水溶液黏度的影響。

一般常用 Arrhenius 模式來描述溫度對黏度的影響，也就是絕對黏度取自然對數與溫度倒數為一線性關係，又稱為安德雷德(Andrade) 的黏-溫公式：

$$\eta_T = \eta_\infty \cdot e^{\Delta E/RT}$$

$$\ln \eta_T = \ln \eta_\infty + B \cdot \frac{1}{T}$$

截距 $\ln \eta_\infty$ 為溫度無限大時的黏度係數，而斜率 B 則為活化能($\Delta E/R$)。圖四可以清楚看出，可以將純糖水溶液視為熔體，當蔗糖濃度[S]升高，其極限黏度(η_∞)也呈正比增高。黏-溫關係下的活化能視為流動分子跨越勢壘(potential barrier)由原先位置進入到鄰近「空穴」所需的能量。而濃度及溫度的變化對活化能並沒有太大的影響，蔗糖水溶液的平均活化能約為 18.53 kJ/mol，顯示實驗條件下系統內分子間作用力組成沒有太大的變化。

結 論

精確地評估水溶液中的糖濃度是食品科學與生醫診斷中很重要的參數，然而，傳統的量測技術如：密度之比重法及折射度，容易受到其他可溶物質及色素的干擾，利用糖分子間極強的作用力改變流體的黏滯性，藉由測量黏度將是有效排除干擾、輔助密度與色度分析的重要品質監控技術。

本研究運用奧士瓦黏度計於糖水溶液黏度的量測，並探討濃度與溫度對此量測技術的影響。糖濃度上升將提高糖與水分子間的作用力，使得溶液的流動性降低，進而與管壁的黏滯性變大，移動速度變慢。而溫度升高則提高分子的動能、降低分子間交互作用力，流動性變好。導入理論公式以說明實驗結果之物理原則，觀察量測次數對不確定度的影響，強化基礎原則的應用與計算能力，而指數與反向關係更可以分別透過對數與倒數來呈現。

致 謝

感謝國科會計畫(NSC 100-2113-M-130-001-MY2)的經費支持，得以採購本研究所需之部分實驗設備與耗材。作者感謝編輯以及審查學者的意見，讓本文能夠更佳完善的呈現。

參考文獻

[1] van Zyl JM, Harms TM: A model for estimating the medium properties of Avicel to

ethanol conversion. *Bioprocess Biosyst Eng* 2013, 36:1311-1318.

[2] Rao J, McClements DJ: Impact of lemon oil composition on formation and stability of model food and beverage emulsions. *Food Chem* 2012, 134:749-757.

[3] Koseoglu H, Yigit NO, Civelekoglu G, Harman BI, Kitis M: Effects of chemical additives on filtration and rheological characteristics of MBR sludge. *Bioresour Technol* 2012, 117:48-54.

[4] Manduz S, Sapmaz I, Sanri US, Karahan O, Bascil H, Dogan K: The influence of priming solutions used in cardiopulmonary bypass on blood viscosity in hypothermic conditions. *ASAIO J* 2008, 54:275-277.

[5] Antonova N, Zvetkova E, Ivanov I, Savov Y: Hemorheological changes and characteristic parameters derived from whole blood viscometry in chronic heroin addicts. *Clin Hemorheol Microcirc* 2008, 39:53-61.

[6] Hilzenrat N, Arish A, Yaari A, Almog Y, Sikuler E: Blood viscosity, hemodynamics and vascular hindrance in a rat model of acute controlled bleeding and volume restitution with blood or haemaccel. *Acta Anaesthesiol Scand* 2001, 45:371-376.

[7] Pollice A, Giordano C, Laera G, Saturno D, Mininni G: Rheology of sludge in a complete retention membrane bioreactor. *Environ Technol* 2006, 27:723-732.

[8] Ngadi MO, Yu LJ: Rheological properties of Canadian maple syrup. *Can Biosyst Eng* 2004, 46:3.15-3.18.

[9] Jones G, Talley SK: The viscosity of aqueous solutions as a function of the concentration. *J Am Chem Soc* 1933, 55:624-642.

[10] Nardone E, Dey T, Kevan PG: The effect of sugar solution type, sugar concentration and viscosity on the imbibition and energy intake rate of bumblebees. *J Insect Physiol* 2013, 59:919-933.

[11] Nicolson SW, de Veer L, K hler A, Pirk CW: Honeybees prefer warmer nectar and less viscous nectar, regardless of sugar concentration. *Proc R Soc B* 2013, 280:20131597.

[12] Zimmerman E: Automatic recording of viscosity changes with the Ostwald capillary viscometer. *Anal Biochem* 1967, 21:81-85.

Thermodynamic Aspect on Viscosity Measurements of Sugar Aqueous

Chih-Ping Tsao, Pei-Hsuan Lin, Liang-Yu Chen*

Biotechnology Department, School of Health Technology, Ming Chuan University,
333 Taoyuan, Taiwan, R.O.C.

Abstract

To determine the sugar level of the aqueous solution is a very important indicator in food science and biomedical diagnosis. This study is designed as experimental tools based on college-developed bio-techniques to measure the viscosity and density of the sugar solutions at different concentrations and temperature. The physical factors on the rheological properties of biological fluids are assessed by Ostwald viscometer. In this study, theoretical calculations were utilized for the experimental results to strengthen the physical principles and scientific applications in additions to promoting the accuracy of traditional techniques. According to the Andrade's viscosity-temperature relationship, the average activation energy of sucrose solution was 18.53 kJ/mol.

Keyword: Fluidity, Fluid dynamics, Hagen–Poiseuille equation, Arrhenius model

Corresponding author: Liang-Yu Chen [lokmath@mail.mcu.edu.tw]

Received 3-26-2014 / Revised 4-4-2014 / Accepted 4-4-2014 / Online published
4-15-2014

MC-Transaction on Biotechnology, 2014, Vol. 6, No. 1, e3

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.