

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

土工止水膜之化學浸透性研究(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-039-001-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中國醫藥大學職業安全與衛生系

計畫主持人：趙克平

計畫參與人員：王雅婷、林學謙

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 9 月 30 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 土工止水膜之化學浸透性研究(II)

### Study of Chemical Permeation through Geomembrane(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 93-2211-E-039-001

執行期間：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：趙克平 副教授

共同主持人：

計畫參與人員：王雅婷、林學謙

成果報告類型：精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：中國醫藥大學 職業安全與衛生學系

中華民國 94 年 9 月 1 日

## 摘要

阻水系統(Lining System)為垃圾掩埋場中重要之設施，以防止滲出水污染土壤地下水，目前國內大部分垃圾衛生掩埋場，均使用高密度聚乙烯(HDPE)土工止水膜作為單一阻水襯砌。國內許多事業廢棄物利用掩埋方式處理，其滲出水中之有機溶劑可能藉由擴散作用浸透 HDPE，因此土工止水膜的化學浸透性將不容忽視。

本研究探討氯化碳氫化合物三氯乙烯、三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、二氯甲烷與芳香族碳氫化合物苯、甲苯、乙基苯、苯乙烯等溶劑，在 HDPE 土工止水膜之浸入及浸透現象的相關性，以及厚度與溫度對擴散係數(Diffusion coefficient)、溶解度係數(Solubility coefficient)及浸透係數(Permeation coefficient)之影響。

研究為文獻中首次利用浸入試驗推導HDPE之浸透性，結果發現浸入與浸透之擴散係數、溶解度係數及穩定浸透速率均有顯著相關( $p < 0.05$ )。研究發現厚度會影響擴散係數及溶解度係數，經由電子顯微鏡觀察，本研究所使用之HDPE結構不同。擴散係數、浸透係數及溶解度係數隨溫度之變化，大致均可符合Arrhenius equation及Van't Hoff equation。

雖然浸入與浸透實驗得到之擴散係數與溶解度係數相關性良好，經由Fick's Law建立之質傳模式，發現浸入實驗未能適切模擬ASTM F739浸透試驗結果。因此，簡單且快速之浸入試驗，可應用於評估有機溶劑浸透HDPE之穩定浸透速率；但是，浸透實驗條件較符合垃圾掩埋場不透水布之使用狀況。

關鍵字：土工止水膜(geomembrane)、浸入(immersion)、浸透(permeation)、高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE)

## ABSTRACT

In order to prevent the transport of leachate from the landfill into the surrounding environment, the lining system is the most important. HDPE geomembranes are the most used as lining in Taiwan. Organic solvents in the leachate may permeate through the geomembranes by diffusion. Especially, industrial wastes are also treated by landfill in Taiwan. It is important to concern the organic solvents released from the leachate permeate the geomembrane.

In this study, permeation experiments and immersion tests were conducted to investigate the permeation and immersion of eight pure organic solvents. Comparisons were made between the immersion test and permeation experiment.

The steady state permeation rates determined by the ASTM F739 method were significantly correlated to the immersion test, and their diffusion coefficients and solubility coefficients also showed good correlations ( $p < 0.05$ ). Therefore, the immersion test can be a simple and rapid approach to measure the steady state permeation rate.

The diffusion coefficient and solubility were varied with the thickness of geomembranes. It may be because of the different structure of HDPE geomembranes. The diffusion coefficient and solubility were varied with the temperature and fitted the Arrhenius equation and Van't Hoff equation. Moreover, the modeling results indicated that the diffusion coefficients and solubilities determined by the immersion tests were unable to assess the chemicals permeation through geomembranes. And only permeation experiment can be the situation of the geomembrane in landfill.

Keywords: geomembrane, High Density Polyethylene (HDPE), immersion, permeation

## 研究背景

為防止垃圾掩埋場之滲出水污染地下水，掩埋場中最重要的設施為其阻水系統(Lining System)，其為利用高分子聚合材料之不透水布或滾壓之夯實黏土。而美國環保署 1970 年代末期研究發現，夯實黏土經有機液體滲流後導水度將大幅增加(Brown and Anderson 1980, Brown and Anderson 1983, U.S. EPA 1988)，因此目前垃圾掩埋場大多傾向於使用「不透水布」或稱「地工止水膜」(Geomembrane, GM)做為阻水設施。

我國「一般廢棄物貯存清除處理辦法及設施標準」規定，其導水度要求應在  $10^{-7}$  cm/sec 以下。而國外研究指出，垃圾滲出水可能含有三氯乙烯、二氯甲烷、氯仿及 1,2-二氯乙烷等氯化碳氫化合物與苯、甲苯、乙基苯和苯乙烯等芳香族碳氫化合物，另外更有重金屬污染物，組成成分相當複雜(Rowe 1995; Sangam and Rowe 2001; Park et al. 1996)。當長時間接觸地工止水膜，可能產生化學作用，因壓力或濃度梯度產生分子擴散浸透地工止水膜。尤其國內許多事業廢棄物亦利用掩埋方式處理，其滲出水中之有機溶劑對於地工止水膜化學浸透性影響將不容忽視。

國外對於不透水布之抗化學性研究，目前大多利用浸入(Immersion)實驗的方法(Aminabhav and Naik 1999; Britton et al. 1989; Park et al. 1996)，浸入實驗可以簡

單快速測試HDPE之化學阻抗性，乃將不透水布完全浸泡於有機溶劑中，進而觀察其變化，不需要氣相層析儀(Gas Chromatography, GC)等貴重儀器。ASTM F739 標準方法(Standard Test Method for Resistance Clothing Materials to Permeation by Liquids or Gases under Conditions of Continuous Contact)用於測試防護衣物之浸透性，在ASTM D5886 (Standard Guide for Selection of Test Methods to Determine Rate of Fluid Permeation through Geomembranes for specific Applications)針對地工止水膜之流體浸透性的測試方法中，提出ASTM F739可用以決定化學物質對地工止水膜之浸透性。物質浸入與浸透聚合物薄膜之質傳過程可以Fick's Law來描述，而化學物質浸透單位面積聚合物薄膜之穩定浸透速率(steady-state permeation rate)將決定化學物質在聚合物內之擴散係數(diffusion coefficient)及溶解度係數(solubility coefficient)，然而過去文獻中未曾探討浸入與浸透之擴散係數、溶解度係數及穩定浸透速率等參數之相關性。

現今所使用的地工止水膜厚度大多是 1.5 mm，厚度對擴散係數是否會造成影響仍是一項值得探討的議題；另外，Aminabhavi 及 Naik (1999)研究發現溫度會對芳香族及脂肪族碳氫化合物浸入地工止水膜的擴散係數、溶解度係數造成影響，然而其對浸透實驗之影響及其活化能的探討更是不可忽略。

## 研究目的

本研究參考 ASTM F739 防護衣物浸透測試標準方法及 ASTM D5322 地工合成材料對化學液體阻抗性之浸入試驗標準方法(Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids)，探討有機溶劑於不同溫度時浸透及浸入不同厚度之高密度聚乙烯地工止水膜行為；經由實驗及質傳理論，利用 Fick's Law 分別得到其擴散係數、溶解度係數及穩定浸透速率，比較其相關性並模擬實驗結果，最後利用 Arrhenius equation 及 Van't Hoff equation 探討溫度的影響。本研究不探討地工止水膜於浸透及浸入實驗後之物理、機械及耐久性質之變化

本論文之主要研究目的包括：

- 探討有機溶劑對 HDPE 地工止水膜之浸透性及浸入性；
- 利用 Fick's Law 推導有機溶劑浸透或浸入 HDPE 之擴散係數、溶解度係數及穩定浸透速率；
- 探討浸入與浸透試驗結果之相關性；
- 探討厚度及溫度對有機溶劑浸透及浸入 HDPE 之影響。

## 研究方法

### 浸透實驗(permeation test)

有機溶劑因分子間之吸引力溶入聚合物，薄膜內濃度梯度使有機溶劑在聚合物中擴散，利用隔膜測試腔(diaphragm cell)探討 VOC 蒸氣(vapor)浸透聚合物薄膜之擴散係數  $D_p$ ，聚合物薄膜至於兩腔室中間，有機溶劑置於下方腔室，並測量上方密閉腔室之壓力變化。當聚合物薄膜於長時間浸透 VOC 時，測試腔上方所累積之 VOC 質量  $M$  與時間  $t$  將成線性正比關係；此時，VOC 在薄膜中之擴散亦達到穩定狀態。再利用公式求得擴散係數與溶解度。

### 浸入實驗(immersion test)

根據 ASTM D5322 實驗室鑑定地工合成材料對液體的化學阻抗性之浸入試驗之標準方法，浸入實驗主要將聚合物完全浸入在有機溶劑中，不透水布兩面均接觸有機溶劑，藉由濃度梯度擴散入於聚合物內。許多研究利用聚合物吸收有機溶劑而增加之重量，得到吸附曲線後，再藉由 Fick's Law 得到溶解度與擴散係數 (Aminabhavi 1999; Park and Nibras 1993; Britton et al. 1989)。

### 化學物質於高分子聚合物之浸透機制

有機溶劑以分子型式浸透不透水布(Ortego et al. 1995)，浸透過程包括吸附(sorption)、擴散(diffusion)及脫附(desorption)三個質傳機制。有機溶劑與不透水布因分子間的吸引力使有機溶劑溶解於不透水布表面，此為吸附作用，而有機溶劑因不透水布兩側濃度梯度而擴散，此外有機溶劑將從不透水布另一面脫附(Sangam and Rowe 2001; Haxo and Lahey 1988; Park et al. 1996; Park and Nibras 1993; Vergnaud 1991)，許多研究指出擴散為整個浸透過程中主要的控制機制。

### 有機溶劑浸透聚合物薄膜之擴散係數及穩定浸透速率

有機溶劑因分子間之吸引力溶入聚合物，薄膜內濃度梯度使有機溶劑在聚合物中擴散，其浸透單位面積聚合物薄膜之質傳速率  $J$  ( $ML^{-2}T^{-1}$ ) 可以 Fick's first law 表示：

$$J = -D \frac{dC_z}{dz} \quad (1)$$

式中  $D$  為有機溶劑於聚合物薄膜中之擴散係數 ( $L^2T^{-1}$ )， $C_z$  為有機溶劑在聚合物薄膜中之濃度 ( $ML^{-3}$ )， $Z$  為擴散路徑之距離 ( $L$ )。同時聚合物薄膜中有機溶劑濃度  $C_z$  在厚度方向  $Z$  之一維擴散微分方程式如下：

$$\frac{\partial C_z}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_z}{\partial Z^2} \quad (2)$$

Crank (1975)利用隔膜測試腔(diaphragm cell)探討 VOC 蒸氣(vapor)浸透聚合物薄膜之擴散係數  $D_p$ ，聚合物薄膜至於兩腔室中間，有機溶劑置於下方腔室，並測量上方密閉腔室之壓力變化。Crank 依據實驗狀況假設之邊界條件如下：

- 浸透現象未發生前，厚度  $L$  之薄膜中有機溶劑濃度為零 ( $t=0$ ，all  $Z$ ， $C_z=0$ )；
- 當有機溶劑蒸氣浸入薄膜時，薄膜表面有機溶劑之濃度  $C_{z=0}$  為一定值  $C_0$ ，其一般定義為 VOC 蒸氣在薄膜中的溶解度  $S$  ( $ML^{-3}$ )
- 任何時間薄膜背面之有機溶劑濃度為零( $t>0$ ， $C_{z=L}=0$ )。

隔膜測試腔下方之 VOC 蒸氣擴散至薄膜後，上方腔室中累積質量( $M$ )將增加，因此建立以上方腔室為控制體積之質量平衡式如下：

$$\frac{dM}{dt} = -AD_p \frac{\partial C_z}{\partial Z} \Big|_{z=L} \quad (3)$$

式中  $A$  為隔膜測試腔中接觸 VOC 蒸氣之薄膜面積。依據實驗條件，上方密閉腔室中初始 VOC 質量為零，因此由式(2)及式(3)，在其邊界條件下可積分得到上方密閉腔室於浸透過程中 VOC 之質量：

$$M = \frac{AS}{L} \left[ D_p t + \frac{2L^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{n^2} \left( 1 - \text{EXP} \left( -D_p n^2 \pi^2 t / L^2 \right) \right) \right] \quad (4)$$

聚合物薄膜於長時間浸透狀況下( $t \rightarrow \infty$ )，上式中指數項太小而忽略不計，因此可簡化如下式：

$$M = \frac{AS}{L} \left( D_p t - \frac{L^2}{6} \right) \quad (5)$$

由上式可知當聚合物薄膜於長時間浸透 VOC 時，測試腔上方所累積之 VOC 質量  $M$  與時間  $t$  將成線性正比關係；此時，VOC 在薄膜中之擴散亦達到穩定狀態。因此當  $M=0$ ，式(5)可化為下式：

$$D_p = \frac{L^2}{6t_1} \quad (6)$$

式中  $t_1$  為累積滲透量隨時間變化曲線經其線性部分外插交於  $X$  軸之時間，一般定義為延滯時間(lag time)。  $D_p$  則為 VOC 蒸氣於聚合物薄膜中穩定狀態之擴散係數。

當有機溶劑浸透聚合物薄膜達穩定狀態，若聚合物薄膜厚度為  $L$ ，則式(1)可化為下式：

$$J_s = D_p \frac{C_{z=0} - C_{z=L}}{L} \quad (7)$$

假設任何時間，有機溶劑背面濃度  $C_{z=L}$  為零，則式(7)可表示如下：

$$J_s = D_p \frac{C_{Z=0}}{L} = \frac{D_p S}{L} \quad (8)$$

許多研究利用浸入實驗得到有機溶劑在聚合物薄膜中的溶解度  $S$  (Vahdat and Sullivan 2001; Zeller 1993; Vahdat 1991)，再根據式(8)求得擴散係數  $D_p$ 。

當聚合物薄膜長時間接觸有機溶劑而達穩定狀態時，此時有機溶劑在薄膜內濃度為  $S$  ( $\text{ML}^{-3}$ )，符合 Nerst distribution function 並可建立關係式(Aminabhavi and Naik 1998; Sangam and Rowe 2001)：

$$S = KC_f \quad (9)$$

式中  $K$  為溶解度係數(solubility coefficient)， $C_f$  則為浸透之有機溶劑濃度( $\text{ML}^{-3}$ )。

### 有機溶劑浸入聚合物薄膜之擴散係數及溶解度

國外對於不透水布之抗化學性研究，目前大多利用浸入實驗的方法，根據 ASTM D5322 實驗室鑑定地工合成材料對液體的化學阻抗性之浸入試驗之標準方法，浸入實驗主要將聚合物完全浸入在有機溶劑中，不透水布兩面均接觸有機溶劑，藉由濃度梯度擴散入於聚合物內。許多研究利用聚合物吸收有機溶劑而增加之重量，得到吸附曲線後，再藉由 Fick's Law 得到溶解度與擴散係數(Sangam and Rowe 2001; Aminabhavi 1999; Park and Nibras 1993; Britton et al. 1989)。

在固定吸附蒸氣壓下，隨吸附時間的增加，有機物分子持續進入高分子結構中，Crank (1975)根據浸入實驗狀況所假設之邊界條件及初始條件如下：

- 浸入現象未發生前，厚度  $L$  之薄膜中有機溶劑濃度為零( $t=0$ , all  $Z$ ,  $C_z = 0$ )；
- 當有機溶劑蒸氣浸入薄膜時，薄膜表面有機溶劑之濃度  $C_{Z=0}$  或  $C_{Z=L}$  為一定值  $S$ ，亦即聚合物薄膜平衡時之濃度  $C_\infty$ 。

在此邊界條件下，可得到吸附動力式如下：

$$\frac{C_t}{C_\infty} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left\{-D_i \frac{(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right\} \cos \frac{(2n+1)\pi Z}{L} \quad (10)$$

當聚合物薄膜於長時間浸入下，式(10)可表示如下式：

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left\{-D_i \frac{(2n+1)^2 \pi^2 t}{L^2}\right\} \quad (11)$$

式中  $M_t$  及  $M_\infty$  為聚合物薄膜時間  $t$  及平衡時之吸附量( $M$ )，分別定義如下：

$$\begin{cases} M_t = W_t - W_0 \\ M_\infty = W_\infty - W_0 \end{cases}$$



式中  $W_t$  為時間  $t$  之聚合物薄膜重(M)， $W_0$  為薄膜之初始重量(M)，而  $W_\infty$  為平衡時之薄膜重(M)。利用 Initial rate method，當  $0 \leq M_t/M_\infty \leq 0.6$  時，可簡化式(11)如下：

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{\pi^{1/2}} \left( \frac{D_i t}{L^2} \right)^{1/2} = \left( \frac{16D_i}{\pi L^2} \right)^{1/2} (t)^{1/2} \quad (12)$$

因此於  $M_t/M_\infty$  V.S.  $(t)^{1/2}$  圖中，得到  $0 \leq M_t/M_\infty \leq 0.6$  之斜率  $\theta$ ：

$$\theta = \left( \frac{16D_i}{\pi L^2} \right)^{1/2} \quad (13)$$

最後式(13)可化簡如下式，而得到浸入之擴散係數  $D_i$ ：

$$D_i = \pi \left( \frac{L\theta}{4} \right)^2 \quad (14)$$

許多研究亦利用浸入實驗，以下式計算聚合物薄膜的溶解度  $S$  (Chao et al. 2003, Vahdat and Sullivan 2001; Zeller 1993; Vahdat 1991)：

$$S_i = \frac{W_\infty - W_0}{V} \quad (15)$$

式中  $V$  為高分子聚合膜浸入前之體積( $L^3$ )。

## 結論

本研究探討氯化碳氫化合物三氯乙烯、三氯甲烷、1,2—二氯乙烷、二氯甲烷與芳香族碳氫化合物苯、甲苯、乙基苯、苯乙烯等有機溶劑，在 HDPE 地工止水膜之浸入及浸透現象，並比較其擴散係數、溶解度係數及穩定浸透速率之相關性。另外探討厚度及溫度對擴散係數、溶解度係數及浸透係數之影響。綜合本研究之結果可獲得以下結論：

- 浸入與浸透之擴散係數( $R^2=0.871$ ， $p=0.001$ )、溶解度係數( $R^2=0.805$ ， $p=0.003$ )及穩定浸透速率( $R^2=0.950$ ， $p<0.001$ )均有良好的相關性，其中又以穩定浸透速率之相關性最高；因此可利用浸入試驗快速得到有機溶劑於HDPE之穩定浸透速率，而評估其浸透性。
- 厚度對擴散係數及溶解度係數造成差異，此可能因本實驗所使用之HDPE內部結構不同所致。
- 利用Arrhenius equation及Van't Hoff equation可求得擴散係數及浸透係數的活化能與溶解度係數的熱含量，結果發現浸透實驗之擴散係數、浸透

係數及溶解度係數受溫度影響較浸入實驗為大。

- 根據Fick's Law得到之擴散係數 $D_p$ 及溶解度係數 $K_p$ ，可適當的模擬浸透實驗數據；但在浸透實驗初期階段，HDPE吸附及脫附作用將會影響浸透之模擬結果，尤其HDPE厚度增加時，此現象更為明顯。
- 浸入實驗 $D_i$ 與 $K_i$ 無法完全模擬浸透結果，雖然浸入與浸透實驗得到之穩定浸透速率的相關性良好，但是浸透實驗條件較符合垃圾掩埋場不透水布之使用狀況，宜利用浸透實驗結果評估垃圾滲出水之污染潛勢。

### 主要參考文獻

林佳輝：有機溶劑浸透地工止水膜之擴散模式研究，中國醫藥大學環境醫學研究所，2004 碩士論文。

American Society for Testing and Materials (1995). "Standard guide for selection of test methods to determine rate of fluid permeation through geomembranes for specific applications (ASTM D5886-95)." Philadelphia, PA.

American Society for Testing and Materials (1996). "Resistance of protective clothing materials to permeation by liquids or gases under conditions of continuous contact (ASTM F739-96)." Philadelphia, PA.

American Society for Testing and Materials (1998). "Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids (ASTM D5322-98)." Philadelphia, PA.

Aminabhavi, T.M., and Naik, H.G. (1999). "Sorption/desorption, diffusion, permeation and swelling of high density polyethylene geomembrane in the presence of hazardous organic liquid." *Journal of Hazardous Materials B*: 64, 251-262.

Aminabhavi, T.M., and Naik, H.G. (1998). "Chemical compatibility study of geomembranes -sorption/desorption, diffusion and swelling phenomena." *Journal of Hazardous Materials*, 60, 175-203.

Aminabhavi, T.M., and Naik, H.G. (1998). "Chemical compatibility testing of geomembranes -sorption/desorption, diffusion, permeation and swelling phenomena." *Geotextiles and Geomembranes*, 16, 333-354.

Aminabhavi, T.M., Munnolli, R.S., and Ortego, J. Dale (1996). "Molecular migration of some industrial solvents into fluoropolymer membranes." *Waste Management*, 16(4), 277-287.

Britton, L.N., Ashman, R.B., Aminabhavi, T.M., and Cassidy, P.E. (1989). "Permeation and diffusion of environmental pollutants through flexible polymers." *Journal of Applied Polymer Science*, 38, 227-236.

Chao, Keh-Ping, Lee, Pak-Hing, and Wu, Min-Jet (2003). "Organic Solvents

- Permeation through Protective Nitrile Gloves.” *Journal of Hazardous Materials*, 99(2), 191-201.
- Crank, J. (1975). “*The mathematics of diffusion*.” Oxford Clarendon Press.
- Haxo, H.E., and Lahey, T.P. (1988). “Transport of dissolved organics from dilute aqueous solutions through flexible membrane liners.” *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, 5(4), 275-294.
- Haxo, H.E., and Lahey, T.P. (1985). “Permeability of Polymeric Membrane Lining Materials for Waste Management Facilities.” *Elastomerics*, 29-36.
- Ortego, J.D., Aminabhavi, T.M., and Harlapur, S.F. (1995) “A Review of Polymeric Geosynthetics Used in Hazardous Waste Facilities.” *Journal of Hazardous Materials*, 42, 115-156.
- Park, J.K., Sakti, J.P., and Hoopes, J.A. (1996). “Transport of organic compounds in thermoplastic geomembranes. I: mathematical model.” *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 122 (9), 800-806.
- Park, J.K., Sakti, J.P., and Hoopes, J.A. (1996). “Transport of aqueous organic compounds in thermoplastic geomembranes. II: mass flux estimates and practical implications.” *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 122 (9), 807-813.
- Park, J.K., and Nibras, M. (1993). “Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes.” *Water Environmental Research*, 65, 227-237.
- Prasad, T.V., Brown, K.W., and Thomas, J.C. (1994). “Diffusion coefficients of organics in high density polyethylene (HDPE).” *Waste Management and Research*, 12, 61-71.
- Rowe, R.K. (1995), “Leachate Characterization for MSW landfill.” Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Landfill Symposium, Sardinia, Italy 2, 327-344.
- Sangam, H.P., and Rowe, R.K. (2001). “Migration of dilute aqueous organic pollutants through HDPE geomembranes.” *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 329-357.
- Vahdat, N. (1991). “Estimation of diffusion coefficient for solute-polymer systems.” *Journal of Applied Polymer Science*, 42, 3165-3171.
- Vahdat, N., and Sullivan, V.D. (2001). “Estimation of permeation rate of chemicals through elastometric materials.” *Journal of Applied Polymer Science*, 79, 1265-1272.
- Vergnaud, J.M. (1991), “*Liquid transport processes in polymeric materials: modeling and industrial applications*.” Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Zellers, E.T. (1993). “Three-dimensional solubility parameters and chemical protective clothing permeation. I. Modeling the solubility of organic solvents in viton gloves.” *Journal of Applied Polymer Science*, 50, 513-530.