逆浸透法によるジメチルスルホキシド、 アニリン水溶液の濃縮

丹羽雅裕・大矢晴彦・根岸洋一・松本幹治

横浜国立大学工学部物質工学科 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156

Reverse Osmotic Concentration of Aqueous Dimethylsulfoxide and Aniline Solutions

Masahiro NIWA, Haruhiko OHYA, Youichi NEGISHI
and Kanji MATSUMOTO

Department of Material Science and Chemical Engineering,
Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240

(Received June 25, 1987)

Reverse osmotic concentration of aqueous dimethylsulfoxide and aniline solutions was carried out using composite membranes and cellulose acetate asymmetrical membranes. Separation of DMSO and aniline, and flux through the membrane were measured within the following ranges: conc. of DMSO; 1.5, 3.7, 6.1wt%, conc. of aniline; .35, .75, 1.4wt%, operating pressure 4, 5, 6 Mpa.

PEC-1000 gave the best separation. After RO separation of aqueous aniline solutions, pure water permeation was reduced remarkably with a few exception of the case using ON membrane.

Membrane constants were calculated by Spiegler-Kedem's transport model. The deviation from their model was corrected by compaction coefficients. Estimated separations and fluxes were almost the same as experimental value.

Key words: Membrane, Reverse osmosis, Composite membrane, Cellulose acetate membrane, Membrane constants, Dimethylsulfoxide, Aniline.

緒 言

ジメチルスルホキシド (以下 DMSO と略す) は、極めて有用な非プロトン性極性溶剤として知られている。このため広範に高分子の溶剤として利用されている。たとえば、アクリロニトリルの重合溶剤、ポリアクリロニトリルの紡糸、人工皮革用ポリウレタンのコーティング溶剤などに使用されている。またポリアクリロニトリルの紡糸工程で溶剤として使用された DMSO はこの工程に続く洗浄工程で、約数 % の水溶液として排出される。沸点が 189°C と高い DMSO 水溶液を、水を塔頂成分とした蒸留法で分離するより、これを逆浸透法で回収できれば、省エネ上好ましいと考えられる。従来の研究は、

DMSO 除去を目的としたものがほとんどで、たとえば、Marston¹⁾ は、活性汚泥を用いて実験を行っている。逆浸透法を利用した、分離・濃縮の研究は、以下に示す 2 つがある。Peter ら²⁾ は、ポリビニルアルコール製非対称膜を用いて、40,000 ppm の DMSO 水溶液を 5 MPa の加圧下で、逆浸透分離実験を行い、分離率 60 %、透過流束 $0.2 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ を得ている。Kurihara³⁾ は、東レ㈱の PEC-1000 膜を用い、25°C、5.5 MPa の加圧下で逆浸透分離実験を行い、分離率 99.6 % 透過流束 $0.34 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{day})$ を得ている。

一方、アニリンは、チアゾール、グアニジン誘導体として、ゴムの加硫促進剤に、N-フェニル-2-ナフチルアミン、ジフェニルアミン誘導体として酸化防止剤などに

使用されている。現在の回収法は、酸性水溶液で抽出し、アルカリ性にして分離している。逆浸透法による回収の研究もいくつかなされている。Fangら⁴⁾は、酢酸セルロース膜、NS-100膜、NS-200膜、ポリアミド膜などを用い、1000 ppmのアニリン水溶液を25°C $\pm$ 0.5°C、600 psiの加圧下で逆浸透分離実験を行い、酢酸セルロース膜で20%、NS-100膜で70~80%の分離率を得ている。Kurihara³⁾は、PEC-1000膜を用いて、1 wt%のアニリン水溶液を、25°C、5.5 MPaの加圧下で逆浸透分離実験を行い、分離率95%、0.11 m³/(m²·day)を得ている。Toneら⁵⁾は、酢酸セルロース膜を用いて、3 $\times$ 10⁻² mol/lのアニリン水溶液を20°C $\pm$ 0.5°Cで、20、40、60 atmの加圧下で分離実験を行い、-10~-15%の分離率、2~8 $\times$ 10⁻⁷ mol/(cm²·s)の透過流束値を得ている。

そこで我々は、DMSO濃度1.5、3.7、6.1 wt%の水溶液および0.35、0.75、1.4 wt%のアニリン水溶液を4~6 MPaの加圧下で逆浸透分離実験を行った。使用膜は、PEC-1000膜、FT膜、NS-100膜、ON膜⁶⁾および酢酸セルロース膜である。

1 DMSO水溶液の逆浸透分離

1.1 実験

1.1.1 膜

実験に供した膜は、複合膜として、PEC-1000 (東レ ㈱)、FT-40、FT-30 BWおよびSW (Film Tech), NS-100膜 (自家製) およびON膜 (自家製) である。NS-100膜は、Cadotteら⁷⁾製膜法に従い製膜した。支持膜は、UCC社製のポリサルホンP3500、P1700より製膜した2種類の限外ろ過膜である。ON膜は、NTU-4220 (日東電工 ㈱) ポリイミド限外ろ過膜上に、前報⁶⁾の方法に従って製膜したものである。非対称膜として、Manjikian⁸⁾の標準処法により製膜した酢酸セルロース膜を使用前に90°、87°、85°Cで10分間熱処理を行った3種類を用いた。

1.1.2 逆浸透実験装置

前報⁹⁾の実験装置をそのまま使用した。

1.1.3 試薬および水

DMSOは、一級品 (純正化学 ㈱) をそのまま用いた。実験に供した水は、塩素および酸素による膜の劣化を避けるため、逆浸透過水に100 ppm程度の濃度になるようにチオ硫酸ナトリウムを添加した。

1.1.4 分析

供給液および透過液のDMSO濃度は、全有機炭素分析計 (東芝ベックマン, Model 102型) を用いて行った。

1.1.5 操作条件およびサンプリング

DMSO濃度、1.5、3.7、6.1 wt%のDMSO水溶液を4、5、6 MPaの加圧下で逆浸透分離実験を行った。逆浸透分離実験前後に、約3.5 wt%の食塩水を用いて脱塩率および透過流束を求め、膜の性能評価の指標とした。各々の条件設定の最初の10 mlの透過液は捨てた。その後、透過液の最後の10 mlを採取し、同時に透過流束を測定した。

1.2 実験結果

Fig. 1にON-205を使用した場合の実験結果を示す。操作圧の増大、供給液のDMSO濃度の減少に伴い、透過流束値、分離率ともに増加した。他の膜についても同様の結果を得た。次に、それぞれの膜使用時の分離特性を比較する。FT-40、ON-301膜、CA(85)の分離率は、使用時に低い値を示した。他の膜では、いずれも90%以上の分離率を示し、特にその他のON膜とPEC膜で実験条件下で95%以上の分離率を示した。透過流束値は、PEC膜、FT膜、熱処理温度85°C、88°Cの酢酸セルロース膜で、0.1 mol·m⁻²·s⁻¹以上の値を示した。ついてNS膜が高い流束値を示し、ON膜および

Fig. 1 Experimental data comparing with the calculated solution separation (R_{app}) and permeation flux J_v using Eqs. (1), (4)' and (5)' for DMSO system

Table 1 Change of Membrane Characteristics

Membrane	befor DMSO exp.			after DMSO exp.		
	Pure water	conc. of NaCl 3.5wt%	5MPa	pure water	conc. of NaCl 3.5wt%	5MPa
	flux [mol·m ⁻² ·s ⁻¹]	salt Separation [%]		flux [mol·m ⁻² ·s ⁻¹]	salt Separation [%]	
PEC-1000	.241	.205	99.6	.381	.237	97.6
FT-40	1.62	.651	25.5	.428	.375	25.3
FT-30SW	.845	.296	97.6	.687	.176	95.9
FT-30BW	.838	.343	99.2	.420	.200	98.6
NS-100 P1700	.0946	.0547	95.0	.126	.0645	94.1
NS-100 P3500	.0726	.0472	93.0	.110	.0616	96.6
ON-205	.0124	.0129	97.0	.0372	.0187	97.2
ON-210	.0209	.0188	97.9	.0357	.0177	98.1
ON-220	.0135	.0108	97.7	.0306	.177	99.1
ON-305	.0214	.0150	98.9	.0264	.015	96.4
ON-310	.0114	.00882	35.3	.0428	.00722	66.6
CA(90)	.241	.0300	99.3	.0597	.0316	99.5
CA(88)	.311	.140	98.4	.298	.145	98.8
CA(85)	.289	.149	98.6	.384	.139	98.6

CA(90) 膜は $0.06 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の値を示した。Table 1 に、DMSO 水溶液逆浸透濃縮実験前後に、約 3.5wt% 食塩水を 5MPa の加圧下で、逆浸透分離実験を行った結果を示す。FT 膜で実験後の透過流束が 1/2 程度に減少した。他の膜では劣化現象は、観察されなかった。

1・3 解 析

1・3・1 DMSO 水溶液の諸物性値

25°C における、DMSO 水溶液密度および粘度を実測した。水溶液中の DMSO の拡散係数は、Wilke-Chang¹⁰⁾ の式を用いて算出した。ただし DMSO 常圧沸点モル容量は Perry¹¹⁾ のデータによった。各濃度の DMSO 水溶液の水の示す浸透圧は、Van't Hoff の式より推算した。

1・3・2 輸送方程式

膜面上の DMSO 濃度 C_2 が供給液の DMSO 濃度 C_1 より大きくなる濃度分極現象を生じる。このときの濃度関係は Eq. (1)¹²⁾ によって表現できることが知られている。

$$\frac{C_2 - C_3}{C_1 - C_3} = \exp(J_v' / k) \quad (1)$$

ここで k は物質移動係数であり、Eq. (2) によって求めることができる¹²⁾。

$$N_{Sh} = 1.77 N_{Re}^{0.734} \cdot N_{Sc}^{0.33} \quad (2)$$

Spieler-Kedem の不可逆過程の熱力学¹³⁾ によれば、溶液の透過流束 J_v および溶質の透過流束 J_s は、Eqs. (3), (4), (5), によって表わされる。

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \cdot \Delta \pi) \quad (3)$$

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \cdot \Delta \pi) \quad (4)$$

$$J_s = \omega \Delta \pi + (1 - \sigma) J_v \bar{C}_s \quad (5)$$

彼らは、上式を膜面上の微小区間に分割し、さらに膜全体にわたって積分を行い、Eqs. (6), (7) を得ている。

$$R_{int} = \frac{C_2 - C_3}{C_2} = \frac{\sigma(1 - F)}{1 - \sigma F} \quad (6)$$

ここで

$$F = \exp \left\{ \frac{-(1 - \sigma) J_v'}{P} \right\} \quad (7)$$

$$P = RT\omega$$

である。すなわち、 $J_v' \rightarrow \infty$ とすれば、Eq. (7) より $F \rightarrow 0$ となり、Eq. (6) より $R_{int} \rightarrow \sigma$ となり反射係数 σ を求めることができる。

1・3・3 各膜の膜定数

真の分離率 R_{int} を溶液体積流束の逆数に対してプロットしたのが、Fig. 2 である。ここで溶液体積流束を無限大にした外挿値をカーブフィッティング法により求め、反射係数 σ とした。求めた値を Table 2 に示す。反射係数は PEC 膜で 1.0, FT 膜で 0.975~1.0, NS 膜で 0.965, 0.982, ON 膜では ON-310 膜を除いて 0.961~0.993, CA 膜で 0.931~0.979 を示した。

上記のようにして求めた反射係数を用い、Eqs. (4), (5) より、溶液透過係数 L_p および溶質透過係数 ω を求めた。求めたそれぞれの係数の各溶質濃度の平均値を膜

Fig. 2 Estimation of reflection coefficients by extrapolating to infinite permeation flux using Eqs. (6) and (7) for DMSO system

面上の溶液の示す浸透圧に対してプロットしたのが、Fig. 3 および Fig. 4 である。Fig. 3 に示すように、一部の ON 膜を除いて、供給液の溶質濃度の増大に伴い溶液透過係数は減少する。ここで、DMSO 濃度 0 wt% の外挿値を L_p^0 、傾きを圧密化係数 β_v として求めた。 L_p^0 値は、流束の大きい FT 膜で最も高く $0.11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 前後で、PEC 膜、CA 膜、NS 膜とつづき、ON 膜では、いずれも FT の 1/30 程度と最も小さい。また ON 膜では、製膜時のトリレンジソシアネート濃度、ポリエチレンミン濃度は増大に伴い、 L_p^0 値が減少する傾向を示した。同様に Fig. 4 に示すように、DMSO 濃度 0 wt% の溶質透過係数の外挿値を ω_0 、傾きを β_s として求めた。 ω_0 は、分離率の低い FT-40 膜、ON-310 膜、CA (85) 膜で高い値を示した。他の膜では、いずれも 90 % 以上の分離率を示していることから、 L_p^0 値と同様の相対的関係を示した。PEC 膜など一部の膜を除いて溶質透過係数は、供給液の DMSO 濃度増加に伴い増加した。とくに分離率が低い FT-40 膜と酢酸セルロース膜では、DMSO 濃度増加に伴い、溶質透過係数は、大きく増大した。

Fig. 3 Dependency of hydraulic permeability constants on osmotic pressure of solution on the surface of the membrane for DMSO system

Fig. 4 Dependency of solute permeability constants on osmotic pressure of solution on the surface of the membrane for DMSO system

以上のようにして求めた膜定数を Table 2 に示す。

1・4 考 察

以上の結果より DMSO 水溶液の各膜を用いた逆浸透分離で示す溶液透過流束 J_v および溶質透過流束 J_s は Eqs. (4)', (5)' で表わすことができる。

$$J_v = L_p^0 \exp \left\{ -\beta_v \pi(C_2) \right\} (dP - \sigma d\pi) \quad (4)'$$

$$J_s = \omega_0 \exp \left\{ -\beta_s \pi(C_2) \right\} d\pi + (1 - \sigma) J_v \bar{C}_s \quad (5)'$$

また、濃度分極現象は、Eq. (1) で表わすことができる。

Eqs. (1), (4)', (5)' および Table 2 に示した膜定数を用いて、溶液透過流束および分離率を推算し、推算値を Fig. 1 に合わせて示した。合致は、良好といえ

Table 2 Membrane Constants for DMSO system

Membrane	σ [%]	L_{p0} [$\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{MPa} \cdot \text{s}}$]	ω_0 [$\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{MPa} \cdot \text{s}}$]	β_V [MPa ⁻¹]	β_S [MPa ⁻¹]
		$\times 10^2$	$\times 10^5$		
PEC-100	1.0	7.61	4.81	.158	.105
FT-40	.995	10.8	76.6	.555	-.995
FT-30 SW	.975	11.3	9.20	.418	-.003
FT-30 BW	1.0	10.4	6.04	.426	-.026
NS-100 P1700	.982	1.91	1.59	.070	-.184
NS-100 P3500	.965	1.49	1.78	.044	.081
ON-220	.993	.468	.126	-.148	-.255
ON-210	.991	.461	.161	-.115	-.181
ON-205	.986	.524	.349	-.049	-.159
ON-305	.961	.450	.565	.062	.222
ON-310	.780	.238	2.00	.476	-.095
CA(85)	.931	6.67	18.1	.168	.071
CA(88)	.951	6.27	7.42	.151	-.425
CA(90)	.979	1.21	1.39	.069	-.160

る。しかし、一部、不一致もみられた。これは、操作圧、供給液のDMSO濃度の変化によって、膜の圧密化、膨潤化現象が拮抗して起こるため、Eqs. (4)', (5)'では十分に透過機構を表現し得ないためと考えられる。

2. アニリン水溶液の逆浸透濃縮

2.1 実験

前述の膜のうち、PEC-1000, FT-40, NS-100 P1700, ON-205, ON-305およびCA(90)膜を用い、4~6MPaの加圧下で、0.35, 0.75, 1.4wt%のアニリン水溶液の逆浸透濃縮実験を行った。実験装置は、有効膜面積8.04cm²のセル6個から成る逆浸透分離実験装置である。アニリンは、一級品(純正化学)をそのまま用いた。分析、サンプリング等は、DMSO水溶液分離実験と同様である。

2.2 実験結果

2.2.1 耐アニリン性

Table 3にアニリン水溶液逆浸透分離実験前後の膜分離特性の変化を示す。脱塩率は、FT-40膜で32%から

23%低下したのが例外で、他の膜では、維持された。透過流束は、PEC-1000膜で約1/2, NS-100膜で5/7, FT-40膜で約1/3, CA膜で約1/10に低下した。これは、前報⁶⁾と同様に、支持膜が劣化したためと考えられる。これに対して、ON膜では、絶対値としての透過流束は、PEC-1000膜の1/3, NS-100膜の1/5程度であるが、実験前後で、流束変化は、確認されなかった。

2.2.2 逆浸透実験結果

Fig. 5にON-205膜を一例として実験結果を示す。供給液のアニリン濃度の増大、操作圧の減少に伴い、分離率、透過流束ともに悪化した。2種類のON膜に分離率は、ともに87%以上を示した。しかし、透過流束値は、ポリエチレンイミン濃度2%の膜で0.02~0.04 mol/(m²·

Fig.5 Experimental data comparing with the calculated solution separation (R_{app}) and permeation flux J_v using Eqs. (1), (4)' and (5)' for Aniline system

Table 3 Change of Membrane Characteristics

Membrane	before Aniline exp.			after Aniline exp.		
	Pure water	conc. of NaCl 3.5wt%		Pure water	conc. of NaCl 3.5wt%	
	5MPa			5MPa		
	flux	salt Separation		flux	salt Separation	
	[mol·m ⁻² ·s ⁻¹]	[%]		[mol·m ⁻² ·s ⁻¹]	[%]	
PEC-1000	.226	.139	99.9	.127	.110	99.9
FT-40	1.90	.858	31.9	.530	.459	22.8
NS-100 P1700	.342	.202	91.1	.251	.160	90.8
ON-205	.0440	.0351	94.7	.0595	.0372	96.0
ON-305	.0213	.00829	92.1	.0211	.00987	97.6
CA(90)	.0400	.0222	99.5	.00437	.00251	99.2

Fig. 6 Estimation of reflection coefficients by extrapolating to infinite permeation flux using Eqs. (6) and (7) for Aniline system

Table 4 Membrane Constants for Aniline system

Membrane	σ [%]	L_{p0} [$\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{MPa} \cdot \text{s}}$]	ω_0 [$\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{MPa} \cdot \text{s}}$]	β_v [MPa^{-1}]	β_s [MPa^{-1}]
		$\times 10^2$	$\times 10^4$		
PEC-1000	1.0	2.39	.00928	2.21	-3.78
FT-40	1.0	12.1	138	2.76	-1.23
NS-100 P1700	1.0	4.66	4.951	1.52	-4.95
ON-205	1.0	1.07	.101	2.10	-1.78
ON-305	1.0	.258	.0273	2.70	-1.06
CA(90)	.617	.668	.166	8.14	-6.17

s)の値を示すのに対し、3%では著しく減少し、0.003～0.012程度の値を示した。分離率はPEC膜で最も高く、98.5%以上、次いでON膜が87%以上、NS-100膜で40～70%、CA膜で50%以下、FT膜で20%以下と低下した。流束はFT膜で最も高く、0.2 mol/m²・s以上、NS-100膜で0.1以上、PEC膜で0.04以上、ON-205で0.02以上であった。CA膜では、供給液のアニリン濃度1.4 wt%で、透過流束は、著しく減少した。

2.3 解析

2.3.1 アニリン水溶液の諸物性値

25°Cにおけるアニリン水溶液の密度、粘度を実測した。拡散係数、浸透圧は、1.3.1と同様の方法で求めた。

Fig. 7 Dependency of hydraulic permeability constants on osmotic pressure of solution on the surface of the membrane for Aniline system

Fig. 8 Dependency of solute permeability constants on osmotic pressure of solution on the surface of the membrane for Aniline system

2.3.2 膜定数

1.3.3と同様の方法を用いて、各膜の反射係数 σ を求めたのが、Fig. 6である。反射係数は、CA膜で0.617を示した。他の膜は、いずれも1.0を示した。前述と何様の解析を行い、アニリン濃度0 wt%に対応する溶液透過係数 L_{p0} 、溶質透過係数 ω_0 を求めた。また、膜面上の溶液の示す浸透圧依存性を表わす圧縮率 β_v 、 β_s を求めTable 4に示した。

Fig. 7に示すように、溶液透過係数 L_p^0 は、流束値の

高いFT膜で最も高く、流束値の低いON-305膜で最低値を示した。また、供給液のアニリン濃度変化による溶液透過係数への影響をみると、いずれの膜でも、濃度増大に伴い減少することがわかる。特に、高濃度ではほとんど透過しなかったCA膜で、濃度依存性が最も高い。

Fig. 8 に示すような、溶質透過係数値は、分離率の低いFT膜で最高値を示した。一方、高分離率を示したPEC膜、ON膜で低い値を示した。また溶質透過係数値は、供給液のアニリン濃度増大に伴い、いずれの膜でも増大する傾向を示した。

2・3・3 推算値

以上のように求めた膜定数とEqs. (1), (4)', (5)'を用いて、溶液透過流束および分離率を推算し、Fig. 5に合せて示した。いずれの膜とも一致は良好であり、前述の式をエンジンリングモデル式として採用し得る。

3. 結 語

- (1) DMSO水溶液、アニリン水溶液の逆浸透実験において、PEC-1000膜が最も高い分離率を示す。
- (2) アニリン水溶液の逆浸透分離を行う場合、ON膜以外の膜は、実験後、透過流束が著しく悪化し、特にCA膜は1/10になる..

Literature Cited

- 1) Marston, K. R., F. F. Woodard: *Proc. Ind. Waste. Conf.*, 39th, 735 (1985)
- 2) Peter, S., R. Stefan: *ACS Symp. Ser.*, 154, 281 (1981)
- 3) Kurihara, M.: *Desalination*, 38, 499 (1981)
- 4) Fang, H. H. P., E. S. K. Chian: *Environ. Sci. Tech.*, 10, 364 (1976)
- 5) Tone, S., K. Sinohara, Y. Igarashi, T. Otake: *J. Membrane. Sci.*, 19, 195 (1984)
- 6) 大矢晴彦, 丹羽雅裕, 岡田 実, 奥野浩二, 根岸洋一, 松本幹治: 膜, 11, 115 (1986)
- 7) Cadotte, J. E., L. T. Rozzelle: *OSW R & DP Rept.*, No. 927 (1972)
- 8) Manjikian, S.: *I & EC PRD*, 6, 23 (1967)
- 9) 大矢晴彦, 岡田 実, 奥野浩二, 根岸洋一: 膜, 9, 285 (1984)
- 10) Wilke, C. R., P. Chang: *AIChE J.*, 1, 264 (1955)
- 11) Perry, J. H.: "Chem. Eng. Handbook" 4 th

ed, 14-20, McGraw-Hill, New York (1963)

- 12) Kimura, S., S. Surirajan: *AIChE J.*, 13, 497 (1968)
- 13) Spiegler, K. S., O. Kedem: *Desalination*, 1, 311 (1966)

Nomenclatures

a_w	= activity of water in solution	[-]
C	= molar density	[mol/m ³]
C_i	= molar concentration	[mol/m ³]
D	= diffusivity	[m ² /s]
F	= quantity defined by Eq (7)	[-]
J_i	= molar flux	[mol/(m ² ·s)]
J'_v	= volume flux	[m/(m ² ·s)]
k	= mass transfer coefficient	[m/s]
L_p	= hydraulic permeability	[mol/(m ² ·MPa·s)]
L'_p	= hydraulic permeability	[m ³ /(m ² ·MPa·s)]
N_{re}	= ud/ν	[-]
N_{sc}	= ν/D	[-]
N_{sh}	= kd/D	[-]
P	= pressure	[MPa]
P	= ωRT	[m/s]
R	= gas constant	[J/(mol·K)]
R	= solute separation	[-]
R_{app}	= separation $(C_1 - C_3)/C_1$	[-]
R_{int}	= separation $(C_2 - C_3)/C_2$	[-]
T	= temprature	[K, °C]
u	= velocity of solution	[m/s]
	parallel to membrane	[m/s]
v_w	= partial molar volume of water	[m ³ /mol]
β_s	= plasticizing coefficient of solute permeability	[1/MPa]
β_v	= solute induced compaction coefficient	[1/MPa]
Δ	= difference	
Π	= osmotic pressure	[MPa]
δ	= reflection coefficient	[-]
ω	= solute permeability	[mol/(m ² ·MPa·s)]

Superscript

- 0 = at zero pressure difference
— = average

Subscript

- S = solute
 V = solution
0 = value extrapolated at infinitesimal concentration
1 = bulk solution
2 = membrane-solution interface
3 = permeate