

تکمیل معادله BET و کاربردهای آن

نوشته :

فرخ فرحان

استاد دانشکده فنی

در مقاله های گذشته (1,2) در خصوص بر جذبی گازها در جامدهای جذب کن شرح دادیم که معادله

معروف Brunauer, Emmet, Teller را با نهادن $x = \frac{p}{p_0}$ می توان پس از یک تبدیل ساده به صورت

زیر نوشت :

$$(1) \quad \frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

V حجم گاز جذب شده در شرایط متعارفی در یک گرم از جسم جاذب بر حسب سانتیمتر مکعب است. V_m ظرفیت تک لایه ای یعنی حجمی از گاز است که برای پوشاندن همه نقاط سطح جاذب از یک قشر یک ملکولی کافی باشد. x عبارت است از فشار نسبی $\frac{p}{p_0}$ که در آن فشار آزمایشی و p_0 فشار بخار سیر شده جسم مجذوب در درجه حرارت آزمایش است. C مقدار ثابتی است که هم به جاذب و هم به مجذوب بستگی دارد. باید در تعریف V_m دقیق باشیم. هنگامی که حجم گاز جذب شده به مقدار V_m می رسد ممکن است همه نقاط سطح جاذب پوشیده نشده باشد ولی در قسمتهای دو لایه ای، سه لایه ای ... تعداد کافی ملکولها برای اشغال همه نقاط موجود است. در رابطه بالا نسبت $\frac{V}{V_m}$ در حقیقت تعداد لایه های جذب را نشان می دهد و موقعی که x برابر یک می شود یعنی فشار گاز مجذوب به حد اشباع می رسد این کسر بینهایت می گردد.

در تئوری BET که معادله (1) از روی آن بدست آمده تعداد لایه های بر جذبی بینهایت گرفته شده است

پس برای اجسامی صادق است که سطح آزاد آن بتواند لایه های متعددی را بر خود جای دهد. در عمل آنرا

برای اجسامی با بر جذبی محدود نیز بکار می‌برند به شرطی که مقدار x بین ۰.۳ تا ۰.۳۰ باشد و منحنی تغییرات نسبت به x خطی باشد.

و نیز یادآور شدیم که برای بر جذبی محدودی که تعداد لایه‌ها در هر نقطه بیش از n نباشد سه دانشمند نامبرده معادله زیر را بدست آوردند :

$$(۲) \quad \frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{1+x} \left[\frac{1 - (n+1)x^n + nx^{(n+1)}}{1 + (C-1)x - Cx^{(n+1)}} \right]$$

رابطه بالا به علت مفصل و پیچیده بودن تا کنون کاربرد زیادی نداشته است و ایراد بزرگی به آن وارد است : به ازاء $x \rightarrow 1$ حد عبارت بالا n نیست بلکه کوچکتر از آنست ! اگر برای رفع ابهام دوبار مشتق بگیریم دیده می‌شود که حد معادله بالا برابر است با $\frac{Cn(n+1)}{2(Cn+1)}$. مثلاً برای $C=100$ به ازاء $x \rightarrow 1$

$\frac{V}{V_m} = 27994$ ، $n=0$ ؛ $\frac{V}{V_m} = 17993$ ، $n=3$ ؛ $\frac{V}{V_m} = 1714930$ ، $n=2$ ؛ برابر است با :
 الاخر. پس دیده می‌شود که اثبات معادله (۲) نواقصی دربر داشته است که باید دوباره آنرا بررسی کرد.

نظریه BET و اثبات معادله‌ها

واحد جرم یک جسم جاذب را که اندازه سطح آزاد آن معلوم است در نظر می‌آوریم . ملکولهای جسم مجذوب به همه نقاط این سطح دسترسی دارند و در هر نقطه تعداد بینهایتی از لایه‌های جذبی می‌تواند تشکیل شود .

اگر در فشار مفروض p ، s_0 ، s_1 ، s_2 ، ... سطوحی باشد که از لایه‌های ۰ ، ۱ ، ۲ ، ... تشکیل شده باشد .
 ملکولی جسم مجذوب پوشیده باشد لازم است پس از رسیدن به تعادل اندازه این سطوح تغییر نکند . چون در تعادل مقدار s_0 ثابت است پس طبق استدلال لانگمیر Langmuir باید سرعت تراکم ملکولها در سطح برهنه s_0 برابر باشد با سرعت تبخیر ملکولها از لایه اول یعنی :

$$a_1 p s_0 = b_1 s_1 e^{\frac{-E_1}{RT}}$$

در این رابطه E_1 حرارت جذب در لایه اول و a_1 و b_1 مقادیر ثابت مربوط به لایه ۱ هستند . همچنین پس از حصول تعادل باید s_1 ثابت بماند پس باید سرعت تراکم ملکولها در سطح های s_0 و s_1 برابر باشد با سرعت تبخیر ملکولها از سطوح s_1 و s_2 یعنی :

$$a_1 p s_0 + a_2 p s_1 = b_1 s_1 e^{\frac{-E_1}{RT}} + b_2 s_2 e^{\frac{-E_2}{RT}}$$

پس خواهیم داشت :

$$a_r p s_1 = b_r s_r e^{\frac{-E_r}{RT}}$$

a_r و b_r ثابت‌های مربوط به لایه دوم و E_r حرارت جذب در لایه دوم است. و بطور کلی می‌توان نوشت :

$$(۲) \quad a_i p s_{i-1} = b_i s_i e^{\frac{-E_i}{RT}}$$

E_i حرارت جذب لایه i ام و a_i و b_i مقادیر ثابت وابسته به لایه i هستند.

اکنون فرض می‌کنیم که بجز لایه اول گرمای جذب در لایه‌های بعدی فرق زیادی با حرارت میعان جسم مجذوب E_L نداشته باشد.

$$E_r = E_r = E_g \dots = E_i = \dots = E_L$$

و نیز نسبت $\frac{b}{a}$ را برای لایه‌های مختلف را برابر می‌گیریم زیرا هیچ دلیلی برای خلاف آن در دست نیست :

$$\frac{b_r}{a_r} = \frac{b_g}{a_g} = \dots = \frac{b_i}{a_i} = \dots = g \quad \text{مقدار ثابت}$$

حال دو کمیت x و C را با روابط زیرین تعریف می‌کنیم :

$$x = \frac{p}{g} e^{\frac{E_L}{RT}}$$

$$C = \frac{a_1}{b_1} g e^{\frac{E_1 - E_L}{RT}}$$

با این تعاریف تساوی (۳) به صورت ساده زیر درمی‌آید

$$(۴) \quad s_i = x s_{i-1} = C x^i s_0$$

C ثابتی است که بستگی به حرارت جذب در لایه اول دارد و $E_1 - E_L$ را مقدار خالص گرمای جذب نیز نامند (Net heat of adsorption). پس از این مقدمه واضح است که سطح آزاد کلی جسم برابر است با

$$\sum_{i=0}^{i=\infty} s_i \quad \text{و چون در سطح } s_i, i \text{ لایه از ملکولهای مجذوب جای گرفته حجم کلی جذب شده مساوی است با}$$

$$\sum_{i=0}^{i=\infty} i s_i \quad \text{و سرانجام خواهیم داشت :}$$

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\sum_{i=0}^{i=\infty} i s_i}{\sum_{i=0}^{i=\infty} s_i}$$

از رابطه (ε) دیده می‌شود که سطوح s_i پس از s_1 به صورت تصاعد هندسی تغییر می‌کنند و دو مجموع بالا را به آسانی می‌توان حساب کرد و معادله زیر بدست می‌آید :

$$(۱) \quad \frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

که همان رابطه معروف BET است. بطوریکه مشهود است به ازاء $x \rightarrow 1$ مقدار V بینهایت می‌شود که فقط در فشار اشیبای امکان دارد. پس متغیر x همان $\frac{p}{p_0}$ می‌باشد که در آن p_0 فشار بخار سیر شده جسم مجذوب در دمای آزمایش است.

تا اینجا استدلال ما با نوشته‌های Brunauer, Emmet, Teller شباهت دارد. ولی برای جسم جاذبی که در هر نقطه از سطح آن بیش از n لایه‌جای نمی‌گیرد مولفین نامبرده چنین گفتند که اگر تعداد لایه‌ها نتواند از n تجاوز کند لازم است مجموع دو رشته جملات s_i و $i s_i$ را بجای بینهایت تاجمله n ام حساب کنیم و به این ترتیب معادله (۲) را بدست آوردند. پس این دانشمندان قبول کرده‌اند که روابط (۳) حتی برای لایه n ام نیز صادق است در حالیکه چون لایه n ام نمی‌تواند لایه دیگری روی خود جای دهد دارای سطح آزاد نمی‌باشد و سرعت تراکم ملکولها بر آن طبعاً صفر است و نیز سرعت تبخیر آن نیز بسیار کمتر است از لایه‌ای که سطح آزاد داشته باشد.

برای اصلاح طرز استدلال جسم جاذبی از همان نوع در نظر می‌آوریم که سطح آزاد آن با جسم ∞ لایه‌ای برابر باشد ولی نتواند در هیچ نقطه‌ای از سطح بیش از n لایه جای دهد برای لایه‌هایی با مرتبه پائین تر از n تراکم و تبخیر در سطوح آزادی انجام گرفته و شرایط عمل با جسم جاذب ∞ لایه‌ای فرقی ندارد بطوریکه سطوح i که در آنها $i < n$ است با سطوح s_i که قبلاً گفته شد برابر است :

$$(۵) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 = s_0 \\ \sigma_1 = s_1 = Cx s_0 \\ \sigma_2 = s_2 = Cx^2 s_0 \\ \dots \\ \sigma_{n-1} = s_{n-1} = Cx^{n-1} s_0 \end{array} \right.$$

مقدار σ_n مربوط به آخرین لایه قابل جذب را از اینجا بدست می آوریم که باید سطح آزاد ویژه در هر دو حالت برابر باشد .

$$\sum_{i=0}^{i=\infty} s_i = \sigma_n + \sum_{i=0}^{i=n-1} s_i$$

$$(۶) \quad \sigma_n = s_n + s_{n+1} + \dots = Cs_0 \frac{x^n}{1-x}$$

از روابط (۵) و (۶) دو مجموع زیرین را به آسانی حساب می کنیم :

$$\sum_{i=0}^{i=n} \sigma_i = s_0 + \frac{Cs_0 x}{1-x} \quad (\text{مانند حالت پیش})$$

$$\sum_{i=0}^{i=n} i\sigma_i = \frac{Cs_0 x(1-x^n)}{(1-x)^2}$$

از اینجا نسبت $\frac{V}{V_m}$ بدست می آید :

$$(۷) \quad \frac{V}{V_m} = \frac{Cx(1-x^n)}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

این معادله را Pickett نخستین بار به سال ۱۹۴۵ اثبات کرد و یاید به نام وی خوانده شود (3) و Dellyes در ۱۹۶۳ آنرا با استدلال متفاوتی بدست آورد (4,5) و برهان ماشیه است به نوشته های دلیس . حد معادله (۷) به ازاء $x \rightarrow 1$ برابر n است یعنی بهنگام اشباع تعداد لایه ها از n تجاوز نمی کند و به علت سادگی بر معادله (۲) که BET پیشنهاد کرده است برتری دارد و ایراد مذکور را دربر ندارد .

برای مقادیر کوچک x ، $x < 0.3$ ، دو معادله (۱) و (۷) اختلاف زیادی باهم ندارند زیرا x^n کوچک است . از اینجا دیده می شود که روش BET برای محاسبه سطح آزاد همه گونه اجسام جاذب صادق است صرف نظر از اینکه تعداد لایه های جذبی ∞ یا n باشد و تنها شرطی بودن $\frac{x}{V(1-x)}$ بر حسب x است .

اگر n بسیار بزرگ باشد جمله x^n به سوی صفر می گراید و معادله (۷) تبدیل می شود به معادله عمومی BET (۲) .

همچنین برای $n=1$ معادله ای شبیه رابطه لانگمیر بدست می آید :

$$\frac{V}{V_m} = \frac{Cx}{1+(C-1)x}$$

این معادله از رابطه اصلی لانگمیر مناسب تر است و برای $x=1$ مساوی ۱ می شود و لایه جذب شده یکی بیش نیست.

کاربرد معادله نوین

برای بهره‌مندی از معادله Pickett باید در نظر داشت که سطح آزاد یک جسم جاذب به دو بخش تقسیم می شود. یکی سطح بیرونی که در آن تعداد لایه‌های برجذبی می تواند بینهایت باشد. دیگری سطح درونی که تعداد لایه‌های جذبی در آن محدود است. مثلاً جسمی که به حالت گرد است فقط سطح بیرونی دارد که برابر است با مجموع سطوح خارجی ذرات. حال اگر این ذرات دارای سوراخ یا منافذی بودند و یا هر ذره از بهم چسبیدن پولک‌هایی درست شده بود سطح جاذب درونی نیز به وجود می آمد.

باید هشیار بود که تمیز دادن سطح بیرونی از سطح درونی هنگامی میسر است که اختلاف میان این دو از حدود خطاهای عملی تجاوز نکند. اگر معادله (۱) را برای برجذبی ∞ لایه‌ای و معادله (۷) را برای جذب n لایه‌ای بکار بریم و حجم‌های گاز جذب شده را با V_n و V_∞ نمایش دهیم و اگر دو جسم جاذب مشابه یکدیگر یعنی C برای هر دو مشترک باشد برای x معلومی از تفریق دو رابطه خواهیم داشت :

$$\frac{V_\infty - V_n}{V_\infty} = x^n$$

معمولاً برای فشارهای x بین صفر و ۰٫۹ خطای عملی ۱٪ می باشد. پس سطح بیرونی و درونی هنگامی از یکدیگر قابل تمیز هستند که :

$$x^n \leq 0.01 \quad \text{یا} \quad \frac{V_\infty - V_n}{V_\infty} \leq 0.01$$

که برای $x=0.9$ n برابر ۴ می گردد. یعنی اگر تعداد لایه‌های برجذبی از ۴ بیشتر باشد جذب عملاً ∞ لایه‌ای بشمار می آید.

موضوع مهم بدست آوردن تعداد لایه‌های جذب درونی n ، از روی معادله (۷) و معامبه حجم

گاز جذب شده در سطح بیرونی یا سطح درونی است. بدین منظور کمیت‌های زیر را تعریف می کنیم :

C - ثابت جذبی، مشترک برای هر دو سطح

V_{me} - حجم گاز لازم برای پوشش یک لایه‌ای سطح بیرونی

V_{mi} - حجم گاز لازم برای پوشش یک لایه‌ای سطح درونی

V_m - که برابر است با $V_{me} + V_{mi}$

V_e - حجم گازی که سطح بیرونی در فشار نسبی x برخورد جذب کرده است.

V_i - حجم گازی که سطح درونی در فشار نسبی x در خود جذب کرده است.

برای جذب بر سطح بیرونی معادله BET و برای جذب در سطح درونی معادله بیگت ، (۷) ، را

بکار می‌بریم . خواهیم داشت :

$$(۱) \quad V_e = \frac{V_{me}Cx}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

$$(۷) \quad V_i = \frac{V_{mi}Cx(1-x^n)}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

پس V حجم کلی جذب شده برابر است با :

$$V = \frac{Cx}{(1-x)[1+(C-1)x]} [V_{me} + V_{mi}(1-x^n)]$$

$$(۸) \quad V = \frac{Cx}{(1-x)[1+(C-1)x]} (V_m - V_{mi}x^n)$$

حال دو پارامتر V_m و C را به روش BET از روی رسم تغییرات $\frac{x}{V(1-x)}$ بر حسب x بدست می‌آوریم :

$$(۹) \quad \frac{x}{V(1-x)} = \left(\frac{C-1}{CV_m}\right)x + \frac{1}{CV_m}$$

برای $0.05 < x < 0.3$ باید منحنی خطی باشد. ضریب زاویه این خط به اضافه عرض از مبدا مساوی است با

$\frac{1}{V_m}$ و ضریب زاویه تقسیم بر عرض از مبدا برابر است با $C-1$.

پس از پیدا کردن مقدار V_m و C معادله (۸) را تبدیل کرده از آن لگاریتم گرفته به شکل زیرین

می‌نویسیم :

$$(۱۰) \quad \log \left\{ V_m - \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx} \right\} = -n \operatorname{colog} x + \log V_{mi}$$

اکنون اگر تابع $y = \log \left\{ V_m - \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx} \right\}$ را برای هر آزمایش از روی مقادیر

V ، x ، C و V_m حساب کنیم و تغییرات آن را بر حسب $\operatorname{colog} x$ بکشیم باید خط مستقیم بدست آید . غالب

اوقات برای مقادیر کوچک $\operatorname{colog} x$ (یعنی x نزدیک به ۱) نقاط روی خط قرار می‌گیرند ولی برای مقادیر کوچک

x از خط مستقیم منحرف می‌شوند زیرا V_m و C که به روش بالا بدست آوردیم تقریبی هستند و هر قدر x

بزرگتر باشد تأثیر آنها کمتر است

پس با ترسیم خط مربوطه به معادله (۱) از روی ضریب زاویه، تعداد لایه‌های جذب درونی n و از روی عرض از مبدا V_{mi} ظرفیت تک لایه‌ای درونی بدست می‌آید ولی مقدار اخیر دقیق نمی‌باشد. برای محاسبه V_{me} چنین فرض می‌کنیم که به ازاء $x \rightarrow 1$ عمل جذب منحصرأً خارجی است زیرا در فشار اشباعی تعداد لایه‌های برجذبی باید به ∞ برسد. پس کافی است از معادله (۱) حد عبارت زیر برای $x \rightarrow 1$ بدست آوریم:

$$(11) \quad \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx}$$

دیده می‌شود که در مقدار این حد C بی‌تأثیر است زیرا حد $\frac{1+(C-1)x}{Cx}$ برای $x \rightarrow 1$ برابر یک است. بهترین راه اینست که قبول کنیم در حوالی $x=1$ تغییرات تابع (۱۱) به شلجمی $y' = ax^2 + bx + c$ بسیار نزدیک است. پارامترهای a و b و c را با بزرگترین شش مقدار x حساب می‌کنیم. V_{me} برابر خواهد بود با $a+b+c$.

حال اگر تغییرات $\frac{x(1-x^n)}{V_i(1-x)}$ را بر حسب x بکشیم باید خط مستقیم بدست آید زیرا معادله (۷) را می‌توان به رابطه زیر تبدیل کرد:

$$\frac{x(1-x^n)}{V_i(1-x)} = \left(\frac{C-1}{CV_{mi}}\right)x + \frac{1}{CV_{mi}}$$

از روی این خط جوابهای دقیق تری برای V_{mi} و C بدست می‌آید که باید با نتایج قبلی اختلاف نداشته باشد. ولی غالب اوقات C بدست آمده که مربوط به سطح درونی است با مقدار اولیه C فرق خواهد داشت.

مثال عددی و اثبات تجربی

در آزمایشی که با الیاف پنبه کوهی Woolly Asbestos انجام دادیم مقدار جذب اکسیژن O_2 را در آن در $4 \times 188^\circ$ سانتیگراد در فشارهای مختلف برای یک گرم از جسم جاذب اندازه گرفتیم و پس از تبدیل حجم‌ها به شرایط متعارفی ایزوترم برجذبی را رسم کردیم. برای دقت بیشتر نقاط آزمایشی را از روی منحنی تصحیح و نتایج زیرین را بدست آوردیم.

V , cm^3 گاز جذب شده در یک گرم پنبه کوهی

x فشار نسبی

۱۶۰	۰.۰۵
۱۹۳	۰.۱۰
۲۲۵	۰.۱۵
۲۵۵	۰.۲۰
۲۸۵	۰.۲۵
۳۱۲	۰.۳۰
۳۵۲	۰.۳۵
۳۹۲	۰.۴۰
۴۴۰	۰.۴۵
۴۹۰	۰.۵۰
۵۳۵	۰.۵۵
۵۹۰	۰.۶۰
۶۴۲	۰.۶۵
۷۰۰	۰.۷۰
۷۶۰	۰.۷۵
۸۳۰	۰.۸۰
۹۱۵	۰.۸۵
۱۰۲۵	۰.۹۰
۱۱۷۵	۰.۹۵

حال تابع $\frac{x}{V(1-x)}$ را برای همه نقاط حساب کرده بر حسب x رسم کردیم. منحنی حاصل تا $x=0.3$ خط مستقیم بود که از روی آن ضریب زاویه و عرض از مبدا V_m و C را طبق معادله (۹) بدست آوردیم:

$$V_m = 232 \text{ cm}^3 \quad \text{و} \quad C = 30.8$$

با داشتن C مقدار:

$$\frac{1+(C-1)x}{C} = \frac{1+29.8x}{30.8}$$

را برای شش آزمایش آخر حساب کرده با استفاده از مقادیر $\frac{x}{V(1-x)}$ و V_m تابع \ln را بدست آوردیم:

$$y = \log \left\{ V_m - \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx} \right\} \quad x \quad \text{colog } x$$

-۰.۷۲۱	۰.۷۰	۰.۱۰۰
-۰.۳۹۸	۰.۷۵	۰.۱۲۵
-۰.۱۸۷	۰.۸۰	۰.۰۹۷
-۰.۰۲۷	۰.۸۵	۰.۰۷۰۶
۰.۱۱۰۶	۰.۹۰	۰.۰۴۵۸
۰.۲۳۹	۰.۹۵	۰.۰۲۲۳

اکنون نقاطی به عرض y و طول $\text{colog } x$ را در صفحه مختصات مشخص کرده و بهترین خط را از میان آنها مرور می‌دهیم. ضریب زاویه خط n است و از اینجا $n=۷۲۶$ بدست می‌آید.

ضمن این محاسبه مقادیر تابع $y' = \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx}$ بدست آمده‌است که از آخرین شش مقدار برای محاسبه V_{me} ظرفیت یک لایه‌ای بیرونی بهره‌مند می‌شویم:

$$y' = \frac{V(1-x)[1+(C-1)x]}{Cx} \quad x$$

۲۱۳۱	۰.۷۰
۱۹۲۰	۰.۷۵
۱۶۷۳	۰.۸۰
۱۳۸۱	۰.۸۵
۱۰۲۹	۰.۹۰
۰.۵۸۶	۰.۹۵

مقادیر فوق را در رابطه $y' = ax^2 + bx + c$ می‌بریم مقدار متوسط پارامترهای a و b و c بدست می‌آید. به روش میانگین‌ها Method of Averages نتایج زیر حاصل شد: $a = -۱۱۰۰۵$ ، $b = ۱۲۲۱۴$ و $c = -۵۹۶۲$. برای $x=۱$ ، $V_{me} = ۰.۱۳ \text{ cm}^3$ پس $y' = a + b + c = V_{me}$.
 با داشتن V_{me} از دو رابطه زیرین حجم گاز مربوط به جذب بیرونی V_e و جذب درونی V_i را محاسبه می‌کنیم:

$$V_e = \frac{V_{me} C x}{(1-x)[1+(C-1)x]}$$

$$V_i = V - V_e$$

نتیجه محاسبات را در جدول زیر داده‌ایم:

x	V	V_e	V_i	x^n	$\frac{x(1-x^n)}{V_i(1-x)}$
۰٫۰۰	۱۲۶۰	۰٫۰۸۵	۱۲۵۱۰		۰٫۰۳۴۷
۰٫۱۰	۱۲۹۳	۰٫۱۱	۱۲۸۲		۰٫۰۶۱۰۰
۰٫۱۵	۲۲۲۵	۰٫۱۶	۲۲۰۹		۰٫۰۸۴۴
۰٫۲۰	۲۲۵۵	۰٫۱۴	۲۲۴۱		۰٫۱۰۳۷
۰٫۲۵	۲۲۸۵	۰٫۱۶	۲۲۶۹		۰٫۱۲۳۹
۰٫۳۰	۳۲۱۲	۰٫۱۷	۲۲۹۵		۰٫۱۴۵۳
۰٫۳۵	۳۲۵۲	۰٫۱۹	۳۲۳۳		۰٫۱۶۱۷
۰٫۴۰	۳۲۹۲	۰٫۲۱	۳۲۷۱		۰٫۱۷۹۷
۰٫۴۵	۴۲۴۰	۰٫۲۳	۴۲۱۷		۰٫۱۹۶۲
۰٫۵۰	۴۲۹۰	۰٫۲۵	۴۲۶۵		۰٫۲۱۵۰۰
۰٫۵۵	۵۲۳۵	۰٫۲۸	۵۲۰۷	۰٫۰۱۰۷	۰٫۲۳۸۵
۰٫۶۰	۵۲۹۰	۰٫۳۲	۵۲۵۸	۰٫۰۲۰۶	۰٫۲۶۳۳
۰٫۶۵	۶۲۴۲	۰٫۳۶۵	۶۲۰۵۵	۰٫۰۳۷۸	۰٫۲۹۵۱
۰٫۷۰	۷۲۰۰	۰٫۴۳	۶۲۵۷	۰٫۰۶۶۵	۰٫۳۳۱۵
۰٫۷۵	۷۲۶۰	۰٫۵۱	۷۲۰۹	۰٫۱۱۲۴	۰٫۳۷۵۶
۰٫۸۰	۸۲۳۰	۰٫۶۴۵	۷۲۶۵۵	۰٫۱۸۳۴	۰٫۴۲۶۷
۰٫۸۵	۹۲۱۵	۰٫۸۶	۸۲۲۹	۰٫۲۹۰۸	۰٫۴۸۴۸
۰٫۹۰	۱۰۲۲۵	۱٫۳۰	۸۲۹۵	۰٫۴۴۸۹	۰٫۵۵۴۱
۰٫۹۵	۱۱۲۷۰	۲٫۶۰	۹۲۱۰	۰٫۶۷۷۱	۰٫۶۷۴۲

نتیجه - از این محاسبات تعداد لایه های جذب درونی در حدود ۸ درمی آید که با قطر ملکول O_2 و مورفولژی کریستالیت های پنبه کوهی *Chrisotile Asbestos* که به شکل لوله های میان تهی به قطر چندصد انگستر است توافق دارد .

تهران - مهرماه ۱۳۵۰

منابع

- 1- ف. فرحان ، نشریه دانشکده فنی ، شماره ۲ ، ۱۳۴۴ ، صفحه ۳۱-۳۸
- 2- ف. فرحان ، نشریه دانشکده فنی ، شماره ۸ ، ۱۳۴۶ ، صفحه ۱-۱۶
- 3- G. Pickett, J. Am. Chem. Soc., 67, 1958 (1945).
- 4- R. Dellyes, J. Chim. Phys. 60, 1008 (1963).
- 5- E. A. Flood, «The Solid-Gas Interface» , Vol. I, New York, 1967, p. 98.