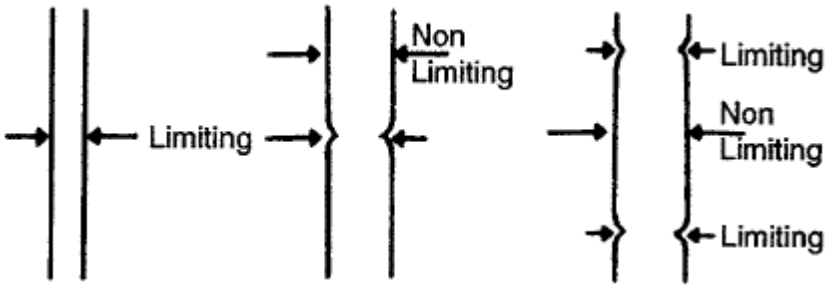
مقدمه:

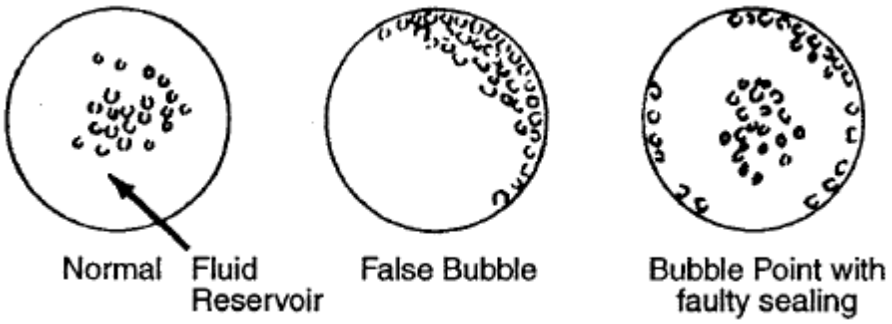
آزمون نقطه حباب معمولا برای یافتن قطر محدودکننده بزرگترین حفره موجود در غشاهای متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد. چون حفرات غشا از بالادست به پایین دست غشا دارای شکل و ساختار یکسانی نیستند، منظور از قطر محدود کننده بزرگترین حفره (maximum limiting pore diameter)، قطر دایره ای است که مطابق شکل سطح آن با سطح کوچکترین بخش حفره برابر باشد.



شکل ۱: نمایش قطر محدود کننده منافذ غشاهای متخلخل

آین آزمون می تواند برای غشاهایی با بزرگترین حفرات بین ۰.۱ تا ۱۵ میکرومتر استفاده شود (طبق تعریف غشا، اندازه منافذ غشا نمی تواند بیش از ۱۰ میکرومتر باشد و فیلترهایی با اندازه منافذ بیشتر از ۱۰ میکرومتر را فیلترهای معمولی می نامند). بنابراین با توجه به اینکه اندازه منافذ غشاهای میکروفیلتراسیون بین ۰.۱ تا ۱۰ میکرومتر است؛ این آزمون عموما برای تعیین قطر بزرگترین منافذ غشاهای میکروفیلتراسیون (یا فیلترهای غشایی) کاربرد دارد.

در این آزمون ابتدا غشا توسط آب (یا میعانات نفتی، اتانول، روغن های معدنی، فرئون) تر شده و سپس در ماژول غشایی (که بعدا در خصوص آن بحث خواهیم کرد) در معرض تماس با یک گاز قرار می گیرد. در بالای ماژول مقداری از سیال ترکنندهٔ اولیه غشا (معمولا آب یا میعانات نفتی و ....) قرار دارد. با افزایش تدریجی فشار گاز در پایین دست غشا، در یک فشار معین اولین حباب های پیوسته گاز از بزرگترین منفذ غشا عبور کرده و از پایین دست غشا خارج شده و ستون مایع روی پایین دست غشا را طی می کند (مطابق شکل ۲). این فشار **فشار نقطه حباب** نام دارد.



شکل ۲: رفتار صحیح تشکیل حباب های پیوسته در آزمون اندازه گیری فشار نقطه حباب (شکل سمت چپ) در مقایسه با سایر شرایط نامناسب عبور حباب گاز (شکل میانی و شکل سمت راست)

در مجموع موارد استفاده از آزمون فشار نقطه حباب به شرح زیر است:

۱) تعیین اندازه بزرگترین حفره در غشاها و فیلترها

۲) مقایسه اندازه بزرگترین حفره در فیلترهای غشایی مختلف

۳) تعیین تاثیر فرایندهای مختلفی همچون فیلتراسیون، پوشش دهی، اتوکلاو کردن بر روی بزرگترین حفره در یک غشا

۴) تعیین عیوب غشایی، درزبندی های نامناسب و یا نشتی های سامانه های غشایی

همانگونه که پیشتر ذکر شد، غشاهای متخلخل دارای منافذ مختلفی هستند که در عرض غشا از یک سمت به سمت دیگر غشا (از بالادست به پایین دست غشا) کشیده شده اند و سیالی که غشا را تر کرده است توسط نیروهای موئینگی و کشش سطحی در داخل منافذ مذکور نگه داشته می شود. از نظر تئوری حداقل فشاری که لازم است تا این سیال مایع را از منافذ غشا خارج کند تابع قطر حفره است. **فشاری که در آن جریان پیوسته ای از حباب های گاز در این آزمون ظاهر می شود را فشار نقطه حباب می گویند.**

با توجه به نوع سیال مایعی که غشا را کاملا تر کرده است، برای تعیین قطر بزرگترین منفذ غشا در این آزمون می توان از رابطه ۱ استفاده کرد:

$$d = C\gamma/p \qquad (۱)$$

که در آن، d قطر محدود کننده بزرگترین حفره بر حسب میکرومتر، γ تنش سطحی بر حسب mN/m (یا dynes/cm)، p فشار بر حسب Pa (یا cmHg) و C ثابت است که اگر γ بر حسب dynes/cm و فشار بر

حسب Pa باشد، مقدار آن برابر ۲۸۶۰، اگر فشار بر حسب cmHg باشد مقدار آن برابر ۲.۱۴۵ و اگر فشار بر حسب psi باشد مقدار آن برابر ۰.۴۱۵ است. به بیان دیگه می توان نوشت:

For centimetres of Hg:

$$d = [2.145\ \gamma\ (\text{dynes/cm})]/[P\ (\text{cm Hg})]$$

For psi:

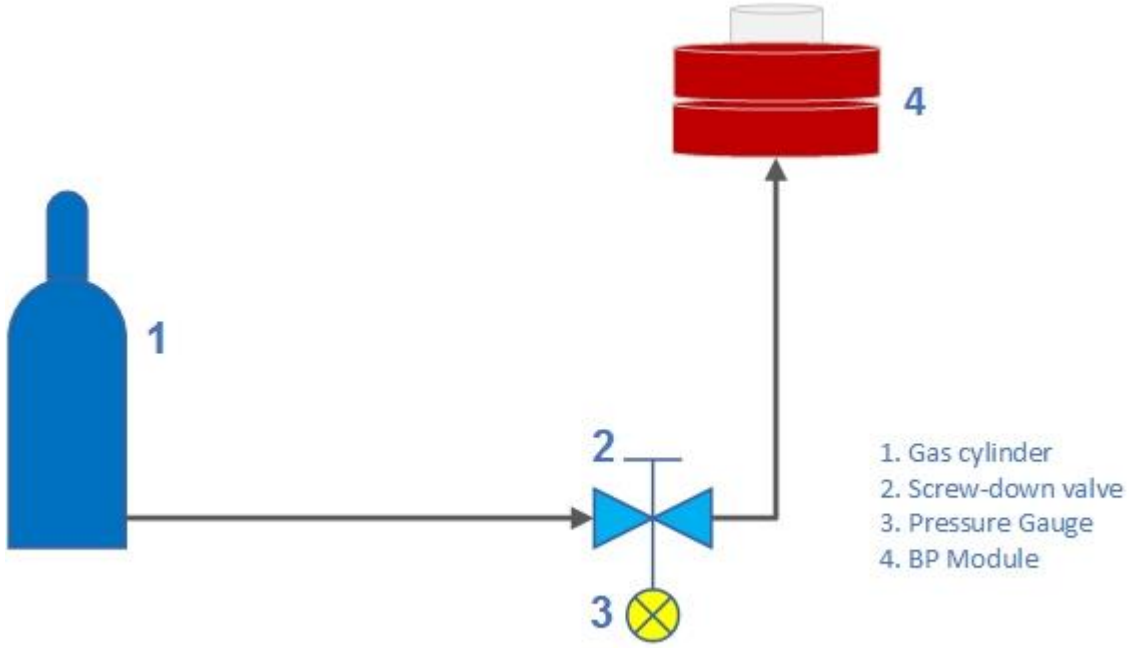
$$d = [0.415\ \gamma\ (\text{dynes/cm})]/[P\ (\text{psi})]$$

For Pa:

$$d = [2860\ \gamma\ (\text{dynes/cm})]/[P\ (\text{Pa})]$$

اجزا و شرح عملکرد سامانه اندازه گیری فشار نقطه حباب

سامانه اندازه گیری فشار نقطه حباب مطابق شکل ۳ از اجزای زیر تشکیل شده است:



شکل ۳: تصویر نمادین سامانه اندازه گیری فشار نقطه حباب

۱-سیلندر فشار بالای هوا و تنظیم کننده (Regulator) فشار ورودی روی سیلندر

۲- تنظیم کننده فشار (Regulator) در مسیر جریان ورودی گاز به ماژول غشایی در بالادست غشا که بر

روی آن یک نشانگر اندازه گیری فشار تعبیه شده است.

۳- ماژول نگه دارنده غشا

ماژول نگه دارنده غشا در سامانه اندازه گیری فشار نقطه حباب (مشابه کل ۴) از اجزای زیر تشکیل شده است:

۱- فلنج تحتانی (از جنس HDPE) که در زیر آن مسیر جریان هوای ورودی تعبیه شده است
۲- حلقه لاستیکی درزبند (O-ring) تعبیه شده بر روی فلنج تحتانی که غشا بر روی آن قرار می گیرد
۳- غشای مدور با سطح موثر ۱۲.۵ سانتی متر مربع
٤- توری پلیمری که برای توزیع جریان هوا پس از عبور از غشا روی آن قرار می گیرد
٥- صفحه متخلخل نگه دارنده از جنس پلی اتیلن که بر روی توری قرار می گیرد
٦- فلنج فوقانی (از جنس HDPE) که بر بالای آن محفظه نگهداری ستون سیال مایع (از جنس پلکسی گلس به ارتفاع ۳ سانتی متر و قطر ۶ سانتی متر) در خروجی جریان هوا قرار گرفته است.

برای تعیین فشار نقطه حباب انواع غشاها، ابتدا غشا را در سیال مورد آزمایش (معمولا آب یا الکل یا سایر مواردی که قبلا در مقدمه ذکر شد) غوطه ور کرده و آن را کاملا توسط سیال مایع مورد آزمایش تر می کنیم. سپس غشای کاملا تر شده را داخل ماژول نگه دارنده غشا قرار داده و محفظه را بسته و درزبندی می کنیم. مقدار اندکی فشار هوا بر روی ماژول اعمال می کنیم تا جریان مایع برگشت نداشته باشد. سپس حدود ۲ تا ۵ میلی متر از مایع مورد آزمایش (که با آن غشا را کاملا تر کرده ایم) را در محفظه نگهداری ستون مایع (تعبیه شده بر روی فلنج فوقانی) ریخته و ضمن باز کردن شیر تنظیم کننده فشار روی سیلندر؛ فشار ورودی از سیلندر را در حدود ۶ بار تنظیم می کنیم. در این شرایط شیر تنظیم کننده جریان هوای ورودی به محفظه کاملا بسته است و بنابراین هیچ گازی امکان ورود به ماژول نگه دارنده غشایی ندارد. در ادامه فشار جریان هوای ورودی به ماژول نگه دارنده به تدریج توسط رگلاتور (شیر تنظیم کننده جریان) واقع بر مسیر جریان هوای ورودی افزایش یافته و مایع واقع بر روی ماژول رصد می شود. فشاری که در آن اولین حباب پیوسته هوا از محفظه نگهداری سیال مایع واقع بر فلنج فوقانی (مطابق تصویر سمت چپ شکل ۲) خارج شود، فشار حباب نامیده می شود. این فرایند حداقل ۳ بار باید تکرار شود و میانگین داده های فشار حباب برای محاسبه بزرگترین قطر منافذ در رابطه ۱ استفاده شود.

سایر جزئیات سامانه اندازه گیری فشار نقطه حباب در زیر آمده است:

TARAVA FARAYAND AFRAZ

تـراوا فرایـند افراز

دستگاه اندازه گیری فشار نقطه حباب (Bubble Pressure Setup)	
شرکت سازنده	تراوا فرایند افراز
سال ساخت	۱۴۰۱
محدوده فشار عملیاتی	0-35 psia
سطح موثر غشا	12.5 cm^2
نوع غشای مورد استفاده	مسطح
محدوده نرخ تراویده	0-200 ml/min
جنس ماژول غشایی	HDPE