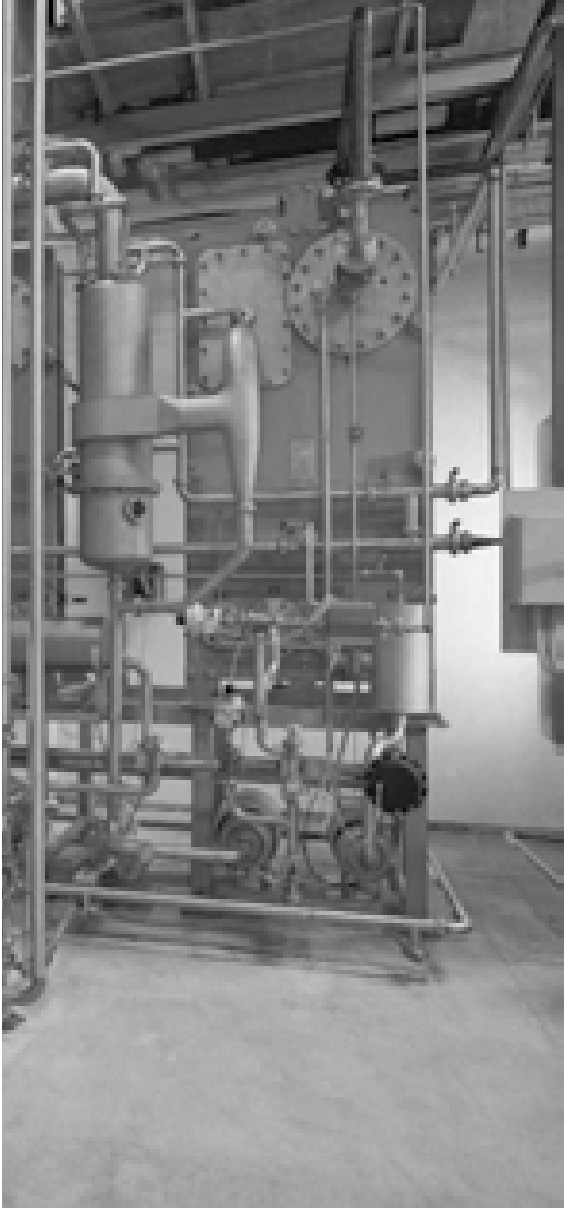

جریان‌سنج برای جریان‌های دارای ویسکوزیته‌ی بالا

نوشته: Corte Swearingen
برگردان: افروز عنایتی

منبع: CHPS Best Practices Manual 2006

هنگام انتخاب یک جریان‌سنج برای جریانی با ویسکوزیته‌ی بالا، نکته‌هایی وجود دارد که کاربر باید به دقت به آنها توجه نماید. انتخاب جریان‌سنجی که بر اساس جریان آب کالیبره شده می‌تواند در جریان‌های با ویسکوزیته‌ی بالا خطاهای بزرگی ایجاد نماید. در ابتدا بعضی از عبارت‌های مقدماتی مانند ویسکوزیته، سیال‌های ویسکوز و علت ایجاد خطای اندازه‌گیری توسط مایعات ویسکوز مورد بحث قرار خواهند گرفت. بعد از آن در مورد مزایای استفاده از فن‌آوری دنده‌های بیضی‌گون برای اندازه‌گیری دبی جریان در خطوط سیالات ویکسوز بحث خواهیم نمود.

تعریف ویسکوزیته

ویسکوزیته (η) عبارت است از نسبت تنش برشی (t) به نرخ برش (γ). اگر می‌توانستیم یک حجم مکعبی از یک سیال را جدا نماییم، می‌توانستیم تنش برشی را به صورت نیروی نسبی (F) بین وجوه بالایی و پایینی مکعب بر واحد سطح (A) مشاهده کنیم. در این صورت نرخ برش به صورت سرعت نسبی (V) بین وجوه بالایی و پایینی، تقسیم بر طول بین آن‌ها (L) تعریف می‌شد. واحدهای تنش برشی در این مقاله دین (dyne) بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته می‌شود. واحد نرخ برش s^{-1} می‌باشد. با استفاده از این واحدها، واحد ویسکوزیته برابر است با $(dyne\ sec)/cm^2$ یا «سانتی پوآز». بیان ساده‌تر و قابل فهم‌تر ویسکوزیته عبارت است از: اندازه‌ی اصطکاک داخلی که هنگام جریان یک سیال به وجود می‌آید. در واقع، هر چه مقاومت سیال در برابر جریان بیشتر باشد، ویسکوزیته‌ی آن بیشتر است.

ویسکوزیته‌ی سینماتیک و دینامیک

مفهوم دیگری که باید درک شود، ارتباط بین ویسکوزیته‌ی دینامیک (همان مفهومی که در بالا به آن اشاره شد) و ویسکوزیته‌ی سینماتیک می‌باشد. ویسکوزیته‌ی سینماتیک به صورت ویسکوزیته‌ی دینامیک تقسیم بر چگالی سیال تعریف می‌شود. از آنجایی که چگالی جزو ویژگی‌های ذاتی خود سیال است، ویسکوزیته‌ی سینماتیک معیار دقیقی از اصطکاک داخلی سیال نیست. با این حال، هنگامی که تنش برشی و نرخ برش سیال تحت تاثیر چگالی باشند، ویسکوزیته‌ی سینماتیک یک واحد ترجیحی می‌باشد. در این مورد به عنوان مثال می‌توان به اندازه‌گیری ویسکوزیته با استفاده از روش وزنی مانند یک فنجان با روزنه‌ی کوچکی در کف آن اشاره نمود. در این ابزار اندازه‌گیری، حجمی مشخص از سیال از میان روزنه عبور می‌نماید و مدت زمانی که طول می‌کشد تا این حجم از سیال از روزنه عبور کند، متناسب با ویسکوزیته‌ی سیال می‌باشد. با این حال این زمان به چگالی سیال نیز بستگی دارد زیرا هر چه سیال چگال‌تر باشد، سرعت عبور آن از روزنه بیشتر خواهد بود. در این صورت ویژگی که در این مثال اندازه‌گیری می‌شود، ویسکوزیته‌ی سینماتیک خواهد بود و نه دینامیک. ویسکوزیته‌ی سینماتیک بر حسب واحد «سانتی استوک» سنجیده می‌شود در حالی که ویسکوزیته‌ی دینامیک با «سانتی پوآز» اندازه‌گیری می‌گردد و تبدیل از دینامیک به سینماتیک، با تقسیم ویسکوزیته‌ی دینامیک بر چگالی سیال بر حسب g/cm^3 به دست می‌آید. به همین دلیل بعضی از تولیدکنندگان ویسکوزیته

را برحسب سانتی پوآز و بعضی دیگر بر حسب سانتی استوک بیان می‌نمایند. توجه به این مساله اهمیت دارد و باید بتوانید این واحدها را به یکدیگر تبدیل نمایید.

سیال‌های نیوتونی و سیال‌های غیرنیوتونی

یک سیال نیوتونی سیالی است که در آن ویسکوزیته به نرخ برش بستگی ندارد- یعنی هر مقدار برشی که اعمال شود، ویسکوزیته ثابت باقی می‌ماند. با این حال در بیشتر کاربردها این شرایط حاکم نیست و هر چه نرخ برش بیشتر باشد، ویسکوزیته تغییر می‌نماید. این نوع سیالات را با عنوان سیال‌های غیرنیوتونی می‌شناسند و طبقه‌بندی‌های زیادی برای آن‌ها وجود دارد. (شکل 2)

ویسکوزیته‌ی یک سیال متسع (dilatent) با افزایش نرخ برش بیشتر می‌شود (مانند مخلوطی از نشاسته‌ی ذرت و آب)، در حالی که ویسکوزیته‌ی یک سیال شبه‌پلاستیکی (pseudoplastic) با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد (مانند بیشتر رنگ‌ها). دسته‌ی دیگر سیالات غیرنیوتونی، چیزی است که سیال پلاستیکی نامیده می‌شود. یک سیال پلاستیکی تا زمانی که به یک نرخ برش بحرانی برسد (که مقدار تسلیم نامیده می‌شود) مانند جامد رفتار می‌کند.

در مقدار تسلیم، سیال جریان خود را آغاز می‌نماید و اگر افزایش نرخ برش ادامه یابد، سیال خصوصیات یک سیال نیوتونی، متسع یا شبه‌پلاستیکی را از خود به نمایش می‌گذارد. سس گوجه‌فرنگی مثال خوبی از یک سیال پلاستیکی است زیرا تا زمانی که مقدار مناسبی برش به آن اعمال نشود- در این مورد تکان دادن شیشه‌ی سس- به سختی جریان می‌یابد.

دو دسته سیال غیرنیوتونی دیگر نیز وجود دارد که برای تکمیل بحث باید به آن‌ها اشاره نمود. اولین گروه تیکسوتروپیک نامیده شده و هنگامی اتفاق می‌افتد که ویسکوزیته‌ی یک سیال در حالی که برش ثابت است با گذشت زمان کاهش می‌یابد. نوع دیگری از سیالات، که با عنوان رئوپکتیک شناخته می‌شود، درست برعکس مورد فوق می‌باشد. در این دسته از سیال‌ها در صورت ثابت بودن برش با گذشت زمان ویسکوزیته افزایش می‌یابد. واضح است که شناسایی کامل ویژگی‌های سیال بسیار اهمیت دارد. تلاش برای پمپ کردن یک سیال متسع می‌تواند پیامدهای ناگواری در آن کاربرد داشته باشد.

اثرات دما

معمولا، ویسکوزیته با دما نسبت عکس دارد و در بعضی از سیالات به ازای هر درجه‌ی سانتی‌گراد، ویسکوزیته 10 تا 12 درصد تغییر می‌کند. اگر انتظار می‌رود دما تغییر نماید، باید تاثیر آن بر روی ویسکوزیته‌ی سیال و کاربرد، مورد بررسی قرار گیرد. جریان‌سنج‌های جبران‌کننده‌ی ویسکوزیته نسبت به دامنه‌ی وسیعی از تغییرات ویسکوزیته (و چگالی) غیرحساس می‌باشند ولی به طور قطع محدودیت‌هایی دارند. بنابراین بهتر است برای بدترین شرایط برنامه‌ریزی گردد و هنگام انتخاب یک جریان‌سنج مشخصات فنی و دستورالعمل‌های تولیدکننده دنبال شود.

مشکلات ناشی از ویسکوزیته

در زمان استفاده از جریان‌سنج، ویسکوزیته چه مشکلاتی ممکن است به وجود آورد؟ برای پاسخ به این پرسش، اجازه دهید یک جریان‌سنج سطح متغیر قرائت مستقیم کالیبره شده برای آب را بررسی کنیم. در طراحی سطح متغیر، شناور با افزایش سرعت جریان، درون یک لوله‌ی عمودی به سمت بالا حرکت می‌کند. در جریان ثابت، شناور بین نیروی بالابرنده‌ی سیال و نیروی رو به پایین وزن در تعادل قرار می‌گیرد.

آب به آسانی در اطراف محیط سطح مقطع شناور حرکت کرده و در حقیقت هیچ چسبندگی به آن ندارد. ولی وقتی ویسکوزیته‌ی سیال افزایش می‌یابد، چسبندگی سیال به شناور آغاز می‌شود و لایه‌هایی بر روی لایه‌ی منطقه‌ی پسای سیال تشکیل می‌دهد که سرعت هر یک از لایه‌ها نسبت به دیگری فرق می‌کند. این اثر موجب می‌شود یک سیال با ویسکوزیته‌ی بالا و حرکت آهسته دارای همان نیروی شناوری یک سیال با ویسکوزیته‌ی پایین و سرعت تندتر باشد. این اثر ممکن است همان‌طور که یک تولیدکننده‌ی مواد غذایی تجربه نمود، کاملا قابل ملاحظه باشد. این تولیدکننده می‌خواست جریان شیر کنسرو شده را در خطوط خود اندازه‌گیری کند. با وجود این که ویسکوزیته تنها 15 سانتی پوآز بود، جریان‌سنج سطح متغیری که بر اساس آب کالیبره شده بود جریان را دو برابر

بیشتر نشان می‌داد. در ویسکوزیته‌های بالاتر، این اثر آشکارتر از این نیز خواهد بود.

یک تولیدکننده‌ی تجهیزات قالب‌گیری فلزی نیز از یک جریان‌سنج سطح متغیر برای قرائت مخلوط آب و روغن حل شونده با ویسکوزیته‌ی 60 سانتی پوآز استفاده می‌نمود. در این مورد، قرائت‌ها شش برابر بیشتر بود. برای این که حساسیت جریان‌سنج‌ها را نسبت به ویسکوزیته کاهش دهیم، راه‌حل این است که از فن‌آوری جریان‌سنجی استفاده کنیم که به بعضی از ویژگی‌های استاتیک سیال مانند هدایت، تراکم‌ناپذیری یا ظرفیت حرارتی تکیه داشته باشد. اگر چه همه‌ی سیالات تا حدودی تراکم‌پذیر می‌باشند، اما اثر این تراکم‌پذیری آنقدر ناچیز است که دقت ذاتی جریان‌سنج دنده بیضی‌گون را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند.

جریان‌سنج دنده بیضی‌گون

طراحی این نوع جریان‌سنج‌ها به نسبت ساده است؛ قسمت‌های چرخنده‌ی دندانه‌دار بیضی شکل در درون محفظه‌ای با شکل هندسی مشخص می‌چرخند. با چرخش این قسمت‌ها، حجم دقیقی از سیال بین قسمت بیرونی‌تر شکل بیضی دنده‌ها و جداره‌های داخلی محفظه جارو شده و به دام می‌افتد و هیچ سیالی عملا از میان دندانه‌های دنده‌ها عبور نمی‌کند.

مغناطیس‌هایی در قسمت‌های چرخنده قرار داده می‌شود که می‌توانند یک کلید نی‌مانند (reed switch) را فعال نمایند یا از طریق یک حسگر اثر هال (Hall Effect)، یک سیگنال خروجی ایجاد نمایند. هر یک از این پالس‌ها نشانگر نمو دقیقی از حجم سیالی می‌باشند که از درون جریان‌سنج عبور می‌نماید. در نتیجه دقت (در حد 0/5 درصد) و تفکیک‌پذیری بسیار خوبی به دست می‌آید که اثرات ناشی از ویسکوزیته، چگالی و دما را تقریبا قابل چشم‌پوشی می‌کند. دقت جریان‌سنج دنده بیضی‌گون به ویسکوزیته بستگی دارد و هرچه ویسکوزیته بیشتر باشد، دقت آن افزایش می‌یابد. دلیل آن کاهش لغزش سیال بین دنده‌ها و جداره‌های محفظه می‌باشد.

لغزش سیال موجب افت دقت می‌گردد. با افزایش ویسکوزیته، لغزش روی دیواره به سرعت به حداقل می‌رسد. حتا در سیال‌های شبیه به آب، دقت بسیار خوب است ولی برای اطمینان بیشتر می‌توانید از تولیدکننده‌ی جریان‌سنج سوال نمایید. تولیدکننده باید بتواند درجه‌بندی دقت را هم برای مایعات شبیه به آب و هم برای سیالات با ویسکوزیته‌ی بالا (که معمولا دارای ویسکوزیته‌ای بین 5 تا 10 سانتی پوآز می‌باشند) در اختیار شما قرار دهد. نصب جریان‌سنج‌های دنده بیضی‌گون ساده است، زیرا طراحی اکثر آن‌ها امکان نصب افقی یا عمودی را فراهم می‌آورد. از آنجایی که نیازی به امتداد مستقیم لوله نیست، این ابزارها را می‌توان در مکان‌های تنگ جاسازی نمود و در نتیجه انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی تاسیسات به دست آورد.

طراحی دنده بیضی‌گون هنگامی که فشار پشت کمی در خط وجود دارد، بهتر کار می‌کند؛ استفاده از یک شیر اختناق در خروجی ابزار نیز معمولا همان تاثیر را دارد. در خصوص اتصال این ابزار به خطوط، معمولا بیشتر تولیدکنندگان آن را با اتصال رزوه‌دار ارایه می‌کنند ولی برای لوله‌هایی با اندازه‌ی بزرگ‌تر، بیشتر تولیدکنندگان این ابزارها را با اتصالات فلنجی ANSI و اتصالات ویژه‌ی شبدری برای کاربردهای بهداشتی ارایه می‌نمایند. اگر سیال شما متسع، پلاستیکی یا رئوپکتیک می‌باشد و می‌خواهید از یک جریان‌سنج دنده بیضی‌گون استفاده نمایید، ابتدا این مساله را با تولیدکننده بررسی کنید. ممکن است لازم شود نمونه‌ای برای آزمایش ارسال نمایید. سیالات نیوتونی، شبه‌پلاستیکی و تیکسوتروپیک تا زمانی که حداکثر سرعت تصدیق شود، مشکلی به وجود نمی‌آورند. سیالی که با جریان‌سنج‌های دنده بیضی‌گون استفاده می‌شود، باید حتما مایع باشد.

این جریان‌سنج‌ها برای گازها، بخار یا سیالات چند فازی مناسب نیستند.

در موقع تعیین اندازه‌ی این جریان‌سنج‌ها، باید در نظر داشته باشید که هرچه ویسکوزیته‌ی سیال بالاتر باشد، برای عبور سیال از درون آن به فشار بیشتری نیاز است. در واقع در مواقعی که سنجش جریان سیالی با ویسکوزیته‌ی بسیار بالا مورد نظر است، افت فشار تنها عامل محدودکننده است. به عنوان مثال برای عبور دادن ملاس از درون جریان‌سنج دنده بیضی‌گون نسبت به عبور گلیسرین از آن به فشار بیشتری نیاز می‌باشد.

قاعده‌ی کلی این است که تا زمانی که سیال جریان دارد و فشار کافی است، جریان‌سنج دنده بیضی‌گون می‌تواند دبی را اندازه بگیرد. در کاربردهایی که افت فشار باید حداقل ممکن باشد، بعضی از تولیدکنندگان قسمت‌های چرخنده را با انواع خاصی جایگزین می‌نمایند. تولیدکننده می‌تواند نموداری از دبی را در برابر افت فشار در سرعت‌های مختلف ترسیم نماید.

خلاصه مطالب

اگرچه این مقاله بر روی سرعت متمرکز شده است، اما توجه به این نکته ضروری است که شاخص‌های دیگری نیز بر انتخاب جریان‌سنج در یک کاربرد تاثیر می‌گذارند. ویسکوزیته، چگالی، فشار و خلوص سیال نیز در کنار عواملی مانند ارتعاش، دامنه‌ی کاربرد و زمان پاسخ مورد نیاز باید مورد توجه قرار گیرند. جریان‌سنج دنده بیضی‌گون تنها یکی از طراحی‌ها در بین فن‌آوری‌های جابه‌جایی مثبت است که می‌تواند در کاربردهای سیالات با ویسکوزیته‌ی بالا استفاده شود. به دلیل قیمت به نسبت کم، سازگاری با چگالی و ویسکوزیته و همچنین سادگی در نصب، جریان‌سنج‌های دنده بیضی‌گون همواره انتخابی مناسب برای بیشتر کاربردها می‌باشند.