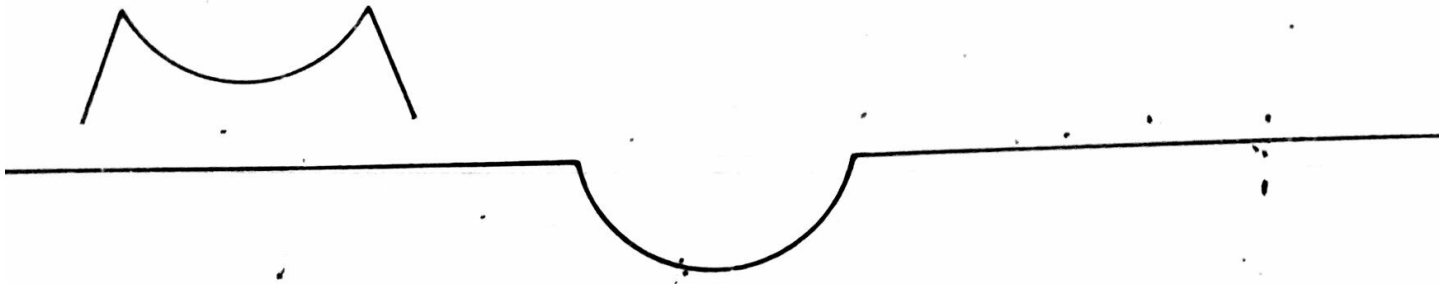


اصول مقدماتی فرایندهای شیمیایی

ریچارد م. فلدر، رونالد و. روسو

ترجمهٔ عبدالعلی فقیه‌اردوبادی، محمدباقر پورسید، داریوش باستانی

۳

فرایندها و متغیرهای فرایند

فرایند به‌عملیات یا رشته‌ای ازعملیات اطلاق می‌شودکه درماده یامخلوطی ازمواد، تغییری فیزیکی یا شیمیایی به‌وجود آورد. موادی‌که به‌فرایند وارد می‌شوند **درونداد** یا **تغذیه** به فرایند نامیده می‌شود و آنهایی کـه فرایند را ترك می‌کنند، **برونداد** یـا **محصول** فرایند خوانده می‌شوند. **واحد فرایندی** دستگاهی است که یکی ازعملیات تشکیل دهندهٔ فرایند درآن انجام می‌گیرد. هر واحد فرایندی با مجموعه‌ای از **جریانهای فرایندی** درونداد و برونداد همراه است که شامل مواد ورودی و خروجی از واحد هستند.

به‌عنوان یك مهندس شیمی ممکن است از شما خواسته شودکـه یکی از واحدهای فرایند (رآکتورها، ستونهای تقطیر، مبدلهای گرمایی ودیگران) را طراحی‌کنید یاعملیات فرایند را سرپرستی‌کنید و یا طرح فرایند را طوری اصلاح‌کنیدکه با تغییرایجاد شده در تغذیه ویا مشخصات محصول مورد نظر مطابقت داشته باشد. به‌عنوان یك قاعده، شما برای انجام دادن هریك ازاین کارها، باید مقادیر، ترکیب نسبی و شرایط موادی‌که به‌هر یك از واحدهای فرایند وارد یا ازآنها خارج می‌شوند، بدانید ویا اگر با واحد دایری سروکار دارید، باید قادر به اندازه‌گیری کافی از هرکدام ازاین‌کمیتها باشید تا بتوانید تشخیص دهیدکه فرایند آنچه را که برای آن طراحی شده است انجام می‌دهد یا نه.

در این فصل، تعریفها، روشهای اندازه‌گیری و روشهای محاسبهٔ متغیرهایی را کـه عملیات فرایندها وعملیات تك تك واحدهای فرایندی را مشخص می‌کنند، ارائه می‌کنیم. در فصلهای بعد، چگونگی استفاده از مقادیراندازه‌گیری شدهٔ برخی از این متغیرها برای

محاسبهٔ کمیتهایی از فرایند را مورد بحث قرار می‌دهیم کـه مستقیماً قـابل اندازه‌گیری نیستند ولی پیش از آنکه فرایند قابل طرح و ارزیابی باشد باید معلوم شوند.

۳-۱ جرم و حجم

چگالی یك جسم عبارت است از جرم واحد حجم آن جسم (lb_m/ft^3 ،g/cm^3 ،kg/m^3 و دیگر.) **حجم ویژهٔ** یك جسم عبارت از حجم واحـد جـرم آن جسم است (m^3/kg، ft^3/lb_m و دیگر) وبنابراین معکوس چگالی است.چگالی جامدات ومایعات خالص نسبتاً مستقل‌از دما وفشار هستند ودرمرجعهای استاندارد (نظیرکتاب راهنمای مهندسین شیمی*، صفحات ۳-۶ تا ۳-۴۴) یافت می‌شوند. روشهای محاسبهٔ چگالی گازها ومخلوط مایعات درفصل پنج همین‌کتاب آمده است.

چگالی یك جسم می‌تواند به‌عنوان ضریب تبدیلی برای مربوط ساختن جرم و حجم جسم مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، چگالی کربن‌تتراکلرید $1.595\ g/cm^3$ است، بنابراین، جرم $20.0\ cm^3$ از CCl_4 برابراست با:

$$\frac{20.0\ cm^3 \mid 1.595\ g}{\mid\ cm^3} = 31.9\ g$$

وحجم $20.6\ lb_m$ از CCl_4 برابراست با

$$\frac{20.6\ lb_m \mid 454\ g \mid 1\ cm^3}{\mid 1\ lb_m \mid 1.595\ g} = 1760\ cm^3$$

گرانش ویژهٔ یك جسم عبارت است از چگالی آن جسم ρ به‌چگالی جسم مرجع ρ_{ref} درشرایط ویژه:

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \qquad (۳-۱-۱)$$

مرجعی‌که غالباً برای جامدات ومایعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، آب $4.0°C$ است‌که چگالی آن به‌صورت زیراست:

$$\rho_{ref}(H_2O,\ 4°C) = 1.000\ g/cm^3$$
$$= 1000\ kg/m^3 \qquad (۳-۱-۲)$$
$$= 62.43\ lb_m/ft^3$$

---

* R. H. Perry and D. W. Green, Eds., *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, 1984.

توجه داشته باشید که چگالی مایعات یا جامدات برحسب g/cm^3 از لحاظ عددی با گرانش ویژهٔ جسم برابر است. علامتگذاری زیر

$$SG = ۰٫۶ \frac{۲۰^\circ}{۴^\circ}$$

نشان می‌دهد که گرانش ویژهٔ جسمی در $۲۰^\circ C$ نسبت به آب $۴^\circ C$ برابر ۰٫۶ است.

اگر گرانش ویژهٔ جسمی داده شده باشد، آن را در چگالی جسم مرجع با هر واحد مطلوب ضرب کنید و چگالی جسم را با همان واحد به‌دست آورید. برای مثال، اگر گرانش ویژهٔ مایعی ۲٫۰۰ باشد، چگالی آن برابر $۲۰۰۰ kg/m^3$ یا $۲٫۰۰ g/cm^3$ یا $۱۲۵ lb_m/ft^3$ است.* گرانش ویژهٔ مایعات و جامدات در جدول ب-۱ مندرج است.

تذکر: واحدهای چگالی خاص، درجه بومه (°Be)، درجهٔ API (°API)، و درجهٔ تووادل (Twaddell) (°Tw)، یا گهگاه به‌کار می‌برند، به ویژه در صنعت نفت. تعریفها و ضرایب تبدیل این واحدها صفحهٔ ۱-۱۹ کتاب راهنمای مهندسین شیمی تألیف پری آمده است.

خود را بیازمایید

۱. واحدهای گرانش ویژه چیست؟

۲. گرانش ویژهٔ مایعی ۰٫۵ است. چگالی آن برحسب g/cm^3 چقدر است؟ حجم ویژهٔ آن برحسب cm^3/g چقدر است؟ چگالی آن برحسب lb_m/ft^3 چقدر است؟ جرم $۳٫۰ cm^3$ از این مایع چقدر است؟ چه حجمی به‌وسیلهٔ ۱۸g از این مایع اشغال می‌شود؟

۳. اگر مواد الف و ب هردو دارای چگالی $۱٫۳۴ g/cm^3$ باشند، آیا جرم $۳ cm^3$ از مادهٔ الف با جرم همان حجم از مادهٔ ب برابر است؟

۴. اگر مواد الف و ب هردو دارای گرانش ویژهٔ ۱٫۳۴ باشند. آیا جرم $۳ cm^3$ از الف باید با جرم همان حجم از ب برابر باشد؟ چرا نه؟ چون ممکن است ماده کار باشد

۵. یک سنگ معدن کوچک، یک استوانهٔ مدرج (با درجات میلی‌لیتر) که می‌تواند سنگ معدن را درخود جای دهد، یک ترازوی درجه‌بندی شده برحسب گرم، و آب در اختیار شما گذاشته شده و از شما خواسته شده‌است که گرانش ویژهٔ سنگ معدن را تعیین کنید. روش کار و محاسبات مربوطه را جمعبندی کنید.

---

* واحدهای ویژهٔ چگالی به‌نامهای درجهٔ بومه (°Bé، Baumé)، درجهٔ A.P.I (°A.P.I) و درجهٔ تووادل (°Tw، Twadell) به‌ندرت و به‌ویژه درصنعت نفت مورداستفاده قرارمی‌گیرند. تعریفها و ضرایب تبدیل این واحدها در صفحهٔ ۱-۲۸ کتاب راهنمای مهندسین‌شیمی داده شده است.

▼ مثال ۳-۱-۱ جرم، حجم و چگالی

چگالی جیوه را برحسب lb_m/ft^3، با استفاده از جدول گرانش ویژه حساب کنید و نیز حساب کنید که ۲۱۵ kg جیوه چه حجمی را برحسب ft^3 اشغال می کند.

حل

درجدول ب-۱، گرانش ویژهٔ جیوه در ۲۰°C، برابر ۱۳٫۵۴۶ درج شده‌است. بنابراین:

$$\rho_{Hg} = (۱۳٫۵۴۶)(۶۲٫۴۳)\frac{lb_m}{ft^3} = \boxed{۸۴۵٫۷\frac{lb_m}{ft^3}}$$

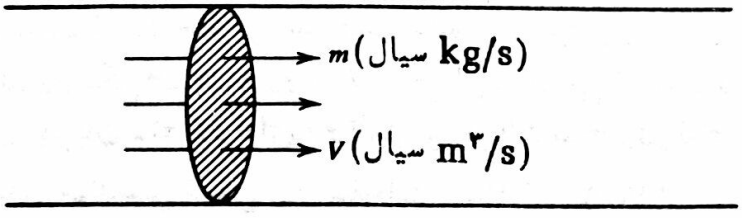
▲
$$V = \frac{۲۱۵\,kg}{} \left| \begin{array}{c|c} ۱\,lb_m & ۱\,ft^3 \\ \hline ۰٫۴۵۴\,kg & ۸۴۵٫۷\,lb_m \end{array} \right. = \boxed{۰٫۵۶۰\,ft^3}$$

۳-۲ سرعت جریان

۳-۲(الف)- سرعت جریان جرمی و حجمی

فرایندهای پیوسته، شامل حرکت مواد ازنقطه‌ای به‌نقطهٔ دیگرهستند ـ گاهی بین واحدهای فرایند،وگاهی از تجهیزات خط تولید به‌انبار حمل ونقل ویا برعکس. سرعت انتقال ماده درطول خط فرایند، **سرعت جریان** نامیده می‌شود.

سرعت جریان جریانی از فرایند می‌تواند به صورت **سرعت جریان جرمی** (زمان/جرم) یا به‌صورت **سرعت جریان حجمی** (زمان/حجم) بیان شود. فرض کنید سیالی (گاز یا مایع) درلوله‌ای استوانه‌ای که در زیرنشان داده شده‌است، جریان داردکه درآن، قسمت هاشورزده شده،نشان دهندهٔ مقطع عمود بر جریان است. اگر سرعت جریان جرمی



سیال $m(kg/s)$ باشد، درهرثانیه m کیلوگرم ازسیال ازاین مقطع می گذرد. اگرسرعت جریان حجمی سیال ازمقطع داده شده $V(m^3/s)$ باشد، در هرثانیه V مترمکعب ازسیال ازمقطع می گذرد. لیکن جرم m وحجم V یك سیال ـ دراین حالت، سیالی‌که درهر ثانیه ازاین مقطع می گذرد ـ کمیتهایی مستقل نیستند بلکه توسط ρ، چگالی سیال، با یکدیگر مربوط می‌شوند.

$$\boxed{\rho = \frac{m}{V}} \qquad (۳-۲-۱)$$

بنابراین، چگالی یک سیال می‌تواند برای تبدیل سرعت جریان حجمی از فرایند به‌سرعت جریان جرمی همان جریان مورد استفاده قرارگیرد یا برعکس.

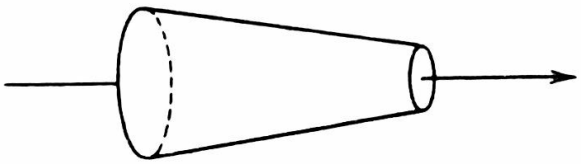
سرعت جریانهای جرمی یک فرایند برای بسیاری از محاسبات فرایند باید معلوم باشد، ولی، غالباً اندازه‌گیری سرعت جریانهای جرمی آسانتراست. بنابراین، روش معمول عبارت است از اندازه‌گیری V ومحاسبهٔ m با استفاده از V و چگالی جریان سیال.

خود را بیازمایید

۱. سرعت جریان جرمی n-هگزان ($\rho = ۰٫۶۵۹\ g/cm^3$) در یک لوله، $۶٫۵۹\ g/s$ است. سرعت جریان حجمی هگزان چقدر است؟

۲. سرعت جریان حجمی CCl_4 ($\rho = ۱٫۵۹۵\ g/cm^3$) در لوله‌ای برابر $۱۰۰٫۰\ cm^3/min$ است. سرعت جریان جرمی CCl_4 را حساب کنید.

۳. فرض کنید گازی درلولهٔ مخروطی شکلی جریان دارد.

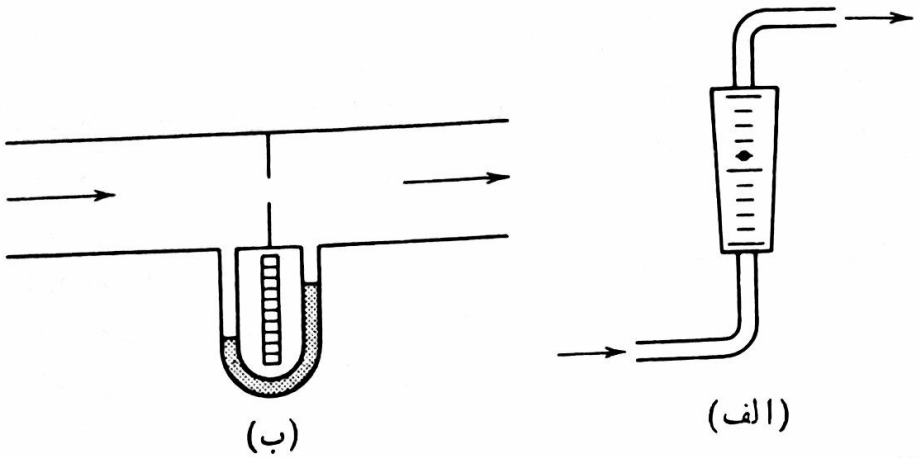


سرعت جریانهای جرمی گاز در محل ورود و محل خروج چگونه مقایسه می‌شوند؟ (قانون بقای جرم را به‌خاطرداشته باشید.) اگرچگالی گازثابت باشد، سرعت جریانهای حجمی دراین دونقطه چگونه مقایسه می‌شوند؟ اگرچگالی از ورودی به‌خروجی کاهش یابد، مقایسه چگونه خواهد بود؟

۳-۲ (ب) ـ اندازه‌گیری سرعت جریان

جریان‌سنج دستگاهی است که در خط فرایند نصب شده و به‌طور پیوسته‌ای سرعت جریان درخط را نشان می‌دهد. درشکل ۳-۲-۱ دونوع ازجریان‌سنجهایی که معمولاً مورداستفاده قرار می‌گیرند ـ **جریان سنج وزنه‌ای روتامتر و جریان سنج روزنه‌ای** ـ نشان داده شده‌اند. کتاب راهنمای مهندسین شیمی در صفحات ۵-۷ تا ۵-۱۷ انواع دیگری از جریان‌سنجها را توضیح می‌دهد.

روتامتر، لوله‌ای مخروطی شکل و عمودی است که دارای یک شناور است، هرچه سرعت جریان بیشتر باشد، شناور موجود درلوله به‌ارتفاع بیشتری صعود می‌کند. جریان‌سنج روزنه‌ای عبارت از مانعی درکانال جریان است که دارای روزنهٔ باریکی است و جریان ازاین روزنه عبور می‌کند. فشارسیال ازبالادست جریان به‌طرف پایین‌دست جریان افت می‌کند؛ افت فشار (با اندازه‌گیر اختلاف فشار، که در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود) با سرعت جریان تغییر می‌کند ـ سرعت جریان بیشتر، افت فشار زیادتری به‌همراه خواهد داشت.



شکل ۳-۲-۱ جریان‌سنجها: (الف) روتامتر و (ب) جریان‌سنج روزنه‌ای.

درمسائل آخر این فصل، درجه‌بندی و استفاده از هردونوع جریان‌سنج توضیح داده می‌شود.

خود را بیازمایید

۱. جریان پایایی از آب به وسیلهٔ یك قیف درمدت ۳۰ s وارد استوانهٔ مدرجی می‌شود، در این مدت ۵۰ ml آب دراستوانه جمع می‌شود. سرعت جریان حجمی چقدر است؟ سرعت جریان جرمی چقدر است؟

۲. جریان‌سنج وزنه‌ای چیست؟ جریان‌سنج روزنه‌ای چیست؟

۳. منحنی درجه‌بندی یك روتامتر(سرعت جریان درمقابل موضع جسم شناور)که بااستفاده ازمایع به‌دست آمده است، اشتباهاً برای اندازه‌گیری سرعت جریان گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتظار دارید سرعت جریان تعیین شده، بسیارکم یا بسیار زیاد باشد؟

تمرین خلاقیت

ذیلاً اولین تمرین از تمریناتی‌که، آن را تمرین خلاقیت نام نهاده‌ایم آمده است. این تمرینها به‌گونهٔ قابل ملاحظه‌ای با انواع مسائلی که شما عادتاً درتکالیف منزل یا امتحانات ملاحظه می‌کنید فرق دارند. درامتحانات، به‌شما آگاهیهایی داده می‌شود وشما می‌بایستی یك پاسخ درست برای سؤال به‌دست آورید. در تمرینهای خلاقیت از شما می‌خواهندکه دربارهٔ بسیاری از پاسخهای ممکن بدون صرف وقت قابل ملاحظه بیندیشید. در این تمرینها پاسخ صحیح یا حتی خوب و یا بد وجود ندارد. هدف این است که به جای کیفیت دنبال‌کمیت و به‌جای درستی به دنبال تصور و تخیل بگردید. کوشش‌کنید قدرت قضاوت انتقادی خودرا به‌طور کامل فعال‌کنید و به‌ایده‌های زیادی برسید و دراین راه به احتمال کارآیی، هزینه، و یا حتی جنبهٔ عملی بودن موضوع توجه ننمایید.

درشرایط صنعتی واقعی، این روش به‌کارگیری مغز و اندیشه به‌منظور حل مسائل، به

صورت خلاق، اغلب به عنوان نخستین اقدام در حل دشوارترین مسائل که شرکت با آن مواجه می‌گردد به‌کار گرفته می‌شود. انجام این تمرینات مهارتهایی را که شما برای اندیشیدن موفقیت‌آمیز نیاز دارید فعالتر می‌سازد و درعین حال به تفهیم گسترده شما در مورد مفهومهای کتاب کمك می‌کند.

بنابراین، دراینجا اولین تمرین خلاقیت مطرح می‌شود. دستگاههایی به‌تعداد ممکن اختراع کنید که به‌عنوان جریان‌سنج گازها یا مایعات، کار کنند، در هرمورد دستگاه وچیزی را که سنجیده می‌شود شرح دهید. (مثال: پروانه‌ای در مسیرجریان قرار دهید وسرعت گردش پروانه را اندازه بگیرید.)

۳-۳ ترکیب نسبی شیمیایی

۳-۳ (الف)- مول و وزن مولکولی

وزن اتمی یك عنصرعبارت ازجرم یك اتم درمقیاسی‌است که درآن جرم ^{12}C (ایزوتوپی ازکربن که هستهٔ آن دارای شش پروتون وشش نوترون است) دقیقاً ۱۲ تعیین شده است. وزن اتمی کلیهٔ عناصر در جدولی در پشت‌کتاب ذکرشده است. **وزن مولکولی** یك مادهٔ مرکب عبارت ازمجموع وزن‌اتمی اتمهایی است که مولکول آن مادهٔ مرکب را می‌سازند؛ مثلاً، وزن اتمی اکسیژن اتمی (O) تقریباً ۱۶ وبنابراین وزن مولکولی اکسیژن مولکولی (O_2) تقریباً ۳۲ است. وزن مولکولی تعدادی از مواد مرکب در جدول ب-۱ داده شده است.

یك **گرم-مول** (g-mole یا mol درسیستم SI) از هر جزء، مقداری از آن جزء است که جرمش برحسب گرم، ازلحاظ عددی، با وزن مولکولی آن برابراست. اگر جزء مورد نظر یك عنصر باشد، از نظر فنی درست‌تر آن است که g-atom به‌جای g-mole به‌کار رود. ما این تمایز را درنظر نمی‌گیریم و moles را هم برای عناصر و هم برای مواد مرکب به‌کارمی‌گیریم. انواع دیگر mole (نظیر kg-mole یا kmol، lb-mole، ton-mole و دیگر) نیز به همین ترتیب تعریف می‌شوند. مثلاً، وزن مولکولی کربن مونوکسید ۲۸ است؛ بنابراین یك مول آن ۲۸g وزن دارد، یك lb-mole دارای ۲۸ lb_m است، یك ton-mole محتوی ۲۸ ton است. به طور خلاصه، اگر وزن مولکولی جسمی M باشد. دراین صورت M kg/kmol، M g/mol، M lb_m/lb-mole، از این جسم خواهیم داشت. بنابراین، وزن مولکولی می‌تواند به عنوان ضریب تبدیلی که جرم و تعداد مول‌های مقداری از جسم را به‌هم مربوط سازد، به کار رود. مثلاً، ۳۴ kg آمونیاك (NH_3 : $M = ۱۷$)، با مقدار زیرهم‌ارز است:

$$\frac{۳۴\ \text{kg}\ NH_3}{۱۷\ \text{kg}\ NH_3} \left| \frac{۱\ \text{kmol}\ NH_3}{} = ۲\ \text{kmol}\ NH_3 \right. \qquad (۱-۳-۳)$$

۴ lb-mole آمونیاك با کمیت زیرهم‌ارز است:

$$\frac{4\ \text{lb-mole NH}_3}{1\ \text{lb-mole NH}_3} \left| \frac{17\ \text{lb}_m\ \text{NH}_3}{} \right. = 68\ \text{lb}_m\ \text{NH}_3 \qquad (۲-۳-۳)$$

(در تبدیلهای جرم-مول، اگر فرمولهای شیمیایی را در معادلات ابعادی، به همان صورتی منظور کنید که در مثال بالا نشان داده شد، مفید خواهد بود.)

همان ضرایبی که در تبدیل جرم از واحدی به‌واحد دیگر مورد استفاده قرار گرفتند، در تبدیل واحدهای مولی هم‌ارز می‌توانند به کار گرفته شوند: مثلاً هر lb_m معادل ۴۵۴g است و بنابراین بدون توجه به جسم مورد نظر، هر lb-mole معادل ۴۵۴ mol است. (ثابت کنید ــ یك lb-mole از جسمی را که وزن مولکولی آن M است به‌مول تبدیل کنید.)

یك گرم-مول از هر جزء دارای $۶٫۰۲ \times 10^{23}$ (عدد آووگادرو[1]) مولکول از آن جزء است.

مثال ۳-۳-۱ تبدیل بین جرم و مول

در ۱۰۰٫۰ g CO_2 ($M = 44٫01$) چه مقدار از کمیتهای زیر موجود است؟ (۱) mol CO_2؛ (۲) lb-mole CO_2؛ (۳) mol C (یا g-atom)؛ (۴) mol O؛ (۵) mol O_2؛ (۶) g O؛ (۷) g O_2؛ (۸) مولکول CO_2.

حل

$$\frac{100٫0\ \text{g CO}_2}{44٫01\ \text{g CO}_2} \left| \frac{1\ \text{mol CO}_2}{} \right. = \boxed{2٫273\ \text{mol CO}_2} \qquad (۱)$$

$$\frac{2٫273\ \text{mol CO}_2}{453٫6\ \text{mol}} \left| \frac{1\ \text{lb-mole}}{} \right. = \boxed{5٫011 \times 10^{-3}\ \text{lb-mole CO}_2} \qquad (۲)$$

هر مولکول CO_2 دارای یك اتم C، یك مولکول O_2 و دو اتم O است. بنابراین $۶٫۰۲ \times 10^{23}$ مولکول CO_2 (۱ mol) دارای ۱ mol C، ۱ mol O_2، و ۲ mol O است. پس:

$$\frac{2٫273\ \text{mol CO}_2}{1\ \text{mol CO}_2} \left| \frac{1\ \text{mol C}}{} \right. = \boxed{2٫273\ \text{mol C}} \qquad (۳)$$

$$\frac{2٫273\ \text{mol CO}_2}{1\ \text{mol CO}_2} \left| \frac{2\ \text{mol O}}{} \right. = \boxed{4٫546\ \text{mol O}} \qquad (۴)$$

$$\frac{2٫273\ \text{mol CO}_2}{1\ \text{mol CO}_2} \left| \frac{1\ \text{mol O}_2}{} \right. = \boxed{2٫273\ \text{mol O}_2} \qquad (۵)$$

---

1. Avogadro

$$\frac{۴٫۵۴۶\ \text{mol O} \mid ۱۶٫۰\ \text{g O}}{\mid\ ۱\ \text{mol O}} = \boxed{۷۲٫۷\ \text{g O}} \qquad (۶)$$

$$\frac{۲٫۲۷۳\ \text{mol O}_۲ \mid ۳۲٫۰\ \text{g O}_۲}{\mid\ ۱\ \text{mol O}_۲} = \boxed{۷۲٫۷\ \text{g O}_۲} \qquad (۷)$$

$$\frac{۲٫۲۷۳\ \text{mol CO}_۲ \mid ۶٫۰۲ \times ۱۰^{۲۳}\ \text{مولکول}}{\mid\ ۱\ \text{mol}} = \boxed{۱٫۳۷ \times ۱۰^{۲۴}\ \text{مولکول}} \qquad (۸)$$

توجه: قسمتهای (۶) و (۷) مستقیماً با توجه به‌فرمول مولکولی، که هر $۴۴٫۰\ \text{g CO}_۲$ محتوی O یا $۳۲٫۰\ \text{g O}_۲$ است، قابل انجام بود، به‌این ترتیب که:

$$\frac{۱۰۰٫۰\ \text{g O}_۲ \mid ۳۲٫۰\ \text{g O}_۲}{\mid\ ۴۴٫۰\ \text{g CO}_۲} = ۷۲٫۷\ \text{g O}_۲$$ ▲

وزن‌مولکولی یک جزء را می‌توان برای مربوط‌ساختن سرعت جریان جرمی پیوسته‌ای ازاین‌گونه با سرعت جریان مولی متناظر مورد استفاده قرار داد. مثلاً، اگر کربن دیوکسید ($\text{CO}_۲ : M = ۴۴٫۰$) در خط لوله‌ای با سرعت ۱۰۰ kg/h جریان داشته باشد، سرعت جریان مولی $\text{CO}_۲$ عبارت است:

$$\frac{۱۰۰\ \text{kg CO}_۲}{\text{h}} \left| \frac{۱\ \text{kmol CO}_۲}{۴۴٫۰\ \text{kg CO}_۲} \right. = ۲٫۲۷\ \frac{\text{kmol CO}_۲}{\text{h}} \qquad (۳-۳-۳)$$

اگر جریان برونداد یک رآکتور شیمیایی دارای $\text{CO}_۲$ باشد که با سرعت ۸۵۰ lb-mole/min جریان دارد، سرعت جریان جرمی متناظر با آن عبارت است از

$$\frac{۸۵۰\ \text{lb-mole CO}_۲}{\text{lb-mole}} \left| \frac{۴۴٫۰\ \text{lb}_\text{m}\ \text{CO}_۲}{\text{lb-mole}} \right. = ۳۷۴۰۰\ \frac{\text{lb}_\text{m}\ \text{CO}_۲}{\text{min}} \qquad (۴-۳-۳)$$

خود را بیازمایید

۱. mol یک جزء با وزن مولکولی M برحسب (الف) تعداد مولکول، (ب) جرم، چقدر است؟

۲. ton-mole یک جزء چیست؟

۳. چند lb-mol و lb_m. از (الف) $\text{H}_۲$، (ب) H در $۱\ \text{lb-mole H}_۲\text{O}$ وجود دارد؟

۴. چند گرم‌ـمول از $۲\ \text{K mol}$ در $\text{C}_۳\text{H}_۸$ از این جسم وجود دارد؟

۵. یکصد کیلوگرم هیدروژن مولکولی ($\text{H}_۲$) در هرساعت به‌رآکتوری تغذیه می‌شود. سرعت جریان مولی آن برحسب g-mole/h چقدر است؟

۳-۳ (ب)- کسرهای مولی و جرمی و وزن مولکولی متوسط

جریانهای فرایندگاهی از یك جسم ولی غالباً از مخلوطی ازمایعات، گازها یا محلولهایی از یك یا چند مادهٔ حل‌شده در حلال مایع، تشکیل می‌شوند.

جملات زیر را می‌توان برای تعریف ترکیب نسبی مخلوطی ازاجسام، ازجمله جزء A، به‌کار برد.

$$\text{کسرجرمی: } x_A = \frac{\text{A جرم}}{\text{جرم کل}} \left(\frac{\text{kgA}}{\text{kg کل}} \text{ یا } \frac{\text{gA}}{\text{g کل}} \text{ یا } \frac{\text{lb}_\text{m}\text{A}}{\text{lb}_\text{m} \text{ کل}} \right) \qquad (۳-۳-۵)$$

$$\text{کسرمولی: } y_A = \frac{\text{A تعداد mol جزء}}{\text{کل mole}} \left(\frac{\text{kmolA}}{\text{kmol}} \text{ یا } \frac{\text{molA}}{\text{mol}} \text{ یا } \frac{\text{lb-moleA}}{\text{lb-mole}} \right) \qquad (۳-۳-۶)$$

درصد جرمی A عبارت است از $100\, x_A$ و **درصد مولی** A عبارت‌است از $100\, y_A$.

▼ مثال ۳-۳-۲ تبدیلهایی با استفاده ازکسرهای جرمی و مولی

محلولی‌دارای ۱۵٪ جرمی ازجزء A ($x_A = 0.15$) و ۲۰٪ مولی ازجزء B ($y_B = 0.20$) است.

۱. جرم A را در ۱۷۵ kg محلول را حساب کنید.

$$\frac{\text{۱۷۵ kg محلول}}{\text{kg محلول}} \left| \frac{\text{۰٫۱۵ kgA}}{} \right. = \boxed{\text{۲۶ kgA}}$$

۲. سرعت جریان جرمی A را درجریانی از محلول با سرعت ۵۳ $\text{lb}_\text{m}/\text{h}$ حساب کنید.

$$\frac{\text{۵۳ lb}_\text{m}}{\text{h}} \left| \frac{\text{۰٫۱۵ lb}_\text{m}\text{A}}{\text{lb}_\text{m}} \right. = \boxed{\text{۸٫۰} \frac{\text{lb}_\text{m}\text{A}}{\text{h}}}$$

(اگر بعد از واحد جرمی یا مولی- مانند lb_m در $\text{lb}_\text{m}/\text{h}$ ۵۳- نام یك جزء ذکر نشود، واحد، به‌معنی واحدکل‌مخلوط یا محلول باید استنباط شود و نه واحد یك جزء ویژه.)

۳. سرعت جریان مولی B را در جریانی از محلول به‌سرعت ۱۰۰۰ mol/min حساب کنید.

$$\frac{\text{۱۰۰۰ mol}}{\text{min}} \left| \frac{\text{۰٫۲۰ mol B}}{\text{mol}} \right. = \boxed{\text{۲۰۰} \frac{\text{mol B}}{\text{min}}}$$

۴. سرعت جریان کل محلول، متناظر با سرعت جریان مولی ۲۸ K mol B/s را حساب کنید.

$$\frac{\frac{۲۵\ \text{kmol B}}{\text{s}} \mid \frac{۱\ \text{kmol محلول}}{۰\text{ر}۲۰\ \text{kmol B}}}{} = \boxed{۱۴۰\ \frac{\text{kmol محلول}}{\text{s}}}$$

۵. جرم محلولی را که محتوی $۳۰۰\ \text{lb}_\text{m}\text{A}$ است، حساب کنید.

$$\frac{۳۰۰\ \text{lb}_\text{m}\text{A} \mid ۱\ \text{lb}_\text{m}\ \text{محلول}}{۰\text{ر}۱۵\ \text{lb}_\text{m}\text{A}} = \boxed{۲۰۰۰\ \text{lb}_\text{m}\ \text{محلول}}$$

▲

توجه داشته باشید که مقدار عددی یک کسر مولی و یا کسر جرمی، به‌واحدهای جرم در صورت و مخرج کسر، تا زمانی که واحدها یکسان باشند، بستگی ندارد. اگر کسر جرمی بنزن در محلولی ۰ر۲۵ باشد، در نتیجه $x_{C_6H_6}$ برابر خواهد بود با: ۰ر۲۵ kg C_6H_6/kg کل، ۰ر۲۵ g C_6H_6/g کل، ۰ر۲۵ lb_m C_6H_6/lb_m کل و غیره.

مجموعه‌ای از کسرهای جرمی را می‌توان (الف) با فرض جرمی از مخلوط به‌عنوان **مبنای محاسبه** (مثل ۱۰۰ kg یا ۱۰۰ lb_m)، (ب) با استفاده از کسرهای جرمی معلوم برای محاسبهٔ جرم هرجزء در کمیت مبنا و تبدیل این جرمها به‌مول، (ج) با به‌دست آوردن نسبت مولهای هرجزء به‌عدد کل مولها، به‌مجموعهٔ هم‌ارزی از کسرهای مولی تبدیل کرد. این روش کار برای تبدیل کسرهای مولی به کسرهای جرمی نیز مورد استفاده می‌گیرد، با این تفاوت که تعداد کل مولها (مثلاً ۱۰۰ mol یا ۱۰۰ lb-mole) به‌عنوان مبنای محاسبه انتخاب می‌شود.

▼ مثال ۳-۳-۳ تبدیل ترکیب نسبی جرمی به ترکیب نسبی مولی

ترکیب نسبی جرمی مخلوطی از گازها به‌صورت زیراست:

O_2 ٪۱۶ (x_{O_2} = ۰ر۱۶ gO_2/g کل)

CO ٪۴ر۰

CO_2 ٪۱۷

N_2 ٪۶۳

ترکیب نسبی مولی مخلوط چیست؟

حل

مبنا: ۱۰۰ g مخلوط. حساب کنید که چند مول از هرجسم وجود دارد.*

---

* ما تعداد بیشتری ازارقام با معنی مجاز را در محاسبات واسطه حفظ خواهیم کرد، ولی در جوابهای نهایی فقط دو رقم را نشان خواهیم داد.

$$n_{O_2}=\frac{100\ \text{g کل}}{\text{g کل}}\left|\frac{0.16\ \text{g}\ O_2}{}\right|\frac{1\ \text{mol}\ O_2}{32.0\ \text{g}\ O_2}=0.500\ \text{mol}$$

$$n_{CO}=(100)(0.040)/28.0=0.143\ \text{mol}$$

$$n_{CO_2}=(100)(0.17)/44.0=0.386\ \text{mol}$$

$$n_{N_2}=(100)(0.63)/28.0=2.250\ \text{mol}$$

$$n_t=n_{O_2}+n_{CO}+n_{CO_2}+n_{N_2}=3.279\ \text{mol}$$

$$\Downarrow$$

$$\left.\begin{aligned}
y_{O_2}&=\frac{n_{O_2}}{n_t}=\frac{0.500}{3.279}=0.15\ \frac{\text{mol}\ O_2}{\text{mol کل}}\\
y_{CO}&=0.143/3.279=0.044\frac{\text{mol CO}}{\text{mol کل}}\\
y_{CO_2}&=0.386/3.279=0.12\frac{\text{mol}\ CO_2}{\text{mol کل}}\\
y_{N_2}&=2.25/3.279=0.69\ \frac{\text{mol}\ N_2}{\text{mol کل}}
\end{aligned}\right\}\ \text{امتحان: } \sum y_i=1.000$$

وزن مولکولی متوسط (یا وزن مولکولی‌میانگین) یك مخلوط، $\overline{M}$ (kg/kmol، $lb_m/lb\text{-mole}$، و غیره.)، نسبت جرم نمونه‌ای از مخلوط (m_t) به تعداد مولهای تمام اجزای (n_t) همان مخلوط است. اگر y_i کسر مـولی iامین جزء مخلوط و M_i نیز وزن مولکولی آن باشد، داریم:

$$\overline{M}=y_1M_1+y_2M_2+\cdots=\sum_{\text{همهٔ اجزاء}} y_iM_i \qquad (۳-۳-۷)$$

تمرین: این‌فرمول را برمبنای یك مول مخلوط ومحاسبهٔ m_t به‌روش‌مثال ۳-۳-۳، به‌دست آورید. اگر x_i کسر جرمی جزء iام باشد، در آن صورت

$$\frac{1}{\overline{M}}=\frac{x_1}{M_1}+\frac{x_2}{M_2}+\cdots=\sum_{\text{همهٔ اجزاء}}\frac{x_i}{M_i} \qquad (۳-۳-۸)$$

(آن را اثبات کنید!) ▲

▼ مثال ۳-۳-۴ محاسبهٔ وزن مولکولی متوسط

وزن مولکولی متوسط هوا را (۱) از ترکیب نسبی مولی تقریبی آن، N_2٪۷۹، O_2٪۲۱

و (۲) از ترکیب نسبی جرمی تقریبی آن، ۷۶٫۷٪ N_2، ۲۳٫۳٪ O_2 حساب کنید.

حل

۱. با استفاده از معادلهٔ ۳ـ۳ـ۷ و با $y_{N_2} = ۰٫۷۹$، $y_{O_2} = ۰٫۲۱$،

$$\bar{M} = y_{N_2} M_{N_2} + y_{O_2} M_{O_2}$$

$$= \frac{۰٫۷۹ \text{ kmol } N_2}{\text{kmol}} \left| \frac{۲۸ \text{ kg } N_2}{\text{kmol}} + \frac{۰٫۲۱ \text{ kmol } O_2}{\text{kmol}} \right| \frac{۳۲ \text{ kg } O_2}{\text{kmol}}$$

$$= \boxed{۲۹ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \left(= ۲۹ \frac{\text{lb}_\text{m}}{\text{lb-mole}} = ۲۹ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

۲. با استفاده از معادلهٔ ۳ـ۳ـ۸،

$$\frac{۱}{\bar{M}} = \frac{۰٫۷۶۷ \text{ g } N_2/\text{g}}{۲۸ \text{ g } N_2/\text{mol}} + \frac{۰٫۲۳۳ \text{ g } O_2/\text{g}}{۳۲ \text{ g } O_2/\text{mol}} = ۰٫۰۳۵ \frac{\text{mol}}{\text{g}}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\bar{M} = ۲۹ \text{ g/mol}}$$

توجه: هوا دارای مقادیر کمی کربن دیوکسید، آرگون وسایر گازهاست که دراین‌محاسبات از آنها چشم‌پوشی شد ولی حضور آنها تغییری در مقدار محاسبه شدهٔ $\bar{M}$ نمی‌دهد. ▲

خود را بیازمایید

۱. وزن مولکولی هیدروژن اتمی تقریباً برابر یك و وزن مولکولی برم اتمی تقریباً برابر ۸۰ است. (الف) کسرجرمی و (ب) کسر مولی برم در HBr چقدر است؟

۲. ۱۰۰ $\text{lb}_\text{m}/\text{min}$ از A ($M = ۲$) و ۳۰۰ $\text{lb}_\text{m}/\text{min}$ از B ($M = ۳$) در درون لوله‌ای جریان دارند. کسر جرمی و کسرمولی A و B چقدر است، سرعت جریان‌جرمی A، سرعت جریان مولی B، سرعت جریان جرمی کل و سرعت جریان مولی کل‌مخلوط چقدراند؟

۳ـ۳ (ج)ـ غلظت

غلظت جرمی هرجزء از یك مخلوط و یا محلول، عبارت از جرم آن جزء در واحد حجم مخلوط یا محلول‌است (g/cm^3، $\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3$، kg/in^3، ...). **غلظت مولی** هرجزء، تعداد مولهای‌آن در واحد حجم مخلوط است (kmol/m^3، lb-mole/ft^3، ...). **مولاریته**

یك محلول عبارت است از مقدار غلظت مولی مادهٔ حل‌شده که برحسب گرم‌ـمول از مادهٔ حل‌شده بر لیتر محلول (مثـلاً محلول ۲ مولار A دارای ۲ mol A درهر لیتر از محلول است) بیان می‌شود.

غلظت یك جسم درمخلوط یا محلول می‌تواند به عنوان ضریب تبدیلی برای مربوط ساختن جرم (یا مولهای) یك جزء در نمونه‌ای ازمخلوط به حجم نمونه، یا سرعت جریان جرمی (یا مولی) یك جزء از یك جریان پیوسته به کل سرعت جریان حجمی همان جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مثال، محلول ۰٫۰۲ مولار از NaOH (یعنی، محلول ۰٫۰۲ mol NaOH/L را) در نظر بگیرید: ۵ لیتراز این محلول دارای مقدار زیر از NaOH است

$$\frac{\text{۵ لیتر} \mid \text{۰٫۰۲ mol NaOH}}{\text{لیتر}} = \text{۰٫۱ mol NaOH}$$

واگرجریانی ازاین محلول با سرعت ۲ L/min جریان داشته‌باشد، سرعت جریان مولی NaOH برابراست با

$$\frac{\text{۲ لیتر} \mid \text{۰٫۰۲ mol NaOH}}{\text{min} \mid \text{لیتر}} = \text{۰٫۰۴} \frac{\text{mol NaOH}}{\text{min}}$$

خود را بیازمایید

محلولی کـه V لیتر حجم دارد، دارای n مول از مـادهٔ حل شدهٔ A به وزن مولکولی M(g A/mol) است. برحسب V، n و M:

۱. غلظت مولی A چیست؟

۲. غلظت جرمی A چیست؟

برحسب C_A(mol A/L) و C_A(g A/L)،

۳. چه حجمی ازمحلول دارای ۲۰ mol از A است؟

۴. سرعت جریان جرمی A درجریانی باسرعت جریان حجمی ۱۲۰ L/h چقدراست؟

▼ مثال ۳-۳-۵ تبدیل بین سرعت جریان جرمی، مولی، و حجمی یك محلول

محلول آبی سولفوریك‌اسید ۰٫۵ مولار بـا سرعت جریان ۱٫۲۵ m^3/min به‌واحدی از فرایند جریان دارد. گرانش ویـژهٔ محلول، ۱٫۰۳ است. (۱) غلظت جرمی H_2SO_4 برحسب kg/m^3، (۲) سرعت جریان جرمی H_2SO_4 برحسب kg/s، و (۳) کسرجرمی H_2SO_4 را حساب کنید.

حل

$$c\left(\frac{\text{kg } H_2SO_4}{m^3}\right)=\frac{\text{۰٫۵ mol } H_2SO_4}{\text{لیتر}}\left|\frac{\text{۹۸ g}}{\text{mol}}\right|\frac{\text{۱ kg}}{\text{۱۰}^3\text{ g}}\left|\frac{\text{لیتر ۱۰}^3}{\text{۱ m}^3}\right. \qquad (۱)$$

$$=\boxed{\text{۴۹}\ \frac{\text{kg } H_2SO_4}{m^3}}$$

$$q\left(\frac{\text{kg } H_2SO_4}{s}\right)=\frac{\text{۱٫۲۵ m}^3}{\text{min}}\left|\frac{\text{۴۹ kg } H_2SO_4}{\text{m}^3}\right|\frac{\text{۱ min}}{\text{۶۰ s}} \qquad (۲)$$

$$=\boxed{\text{۱٫۰}\ \frac{\text{kg } H_2SO_4}{s}}$$

(۳) کسرجرمی H_2SO_4 برابراست با نسبت سرعت جریان جرمی H_2SO_4 ــ که مقدار آن را می‌دانیم ــ به‌کل سرعت جریان جرمی، که می‌توان آن را به‌کمک کل سرعت جریان حجمی وچگالی محلول، حساب کرد.

$$\rho_{\text{محلول}}=(\text{۱٫۰۳})\left(\text{۱۰۰۰}\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)=\text{۱۰۳۰ kg/m}^3$$

$$\Downarrow$$

$$Q_{\text{محلول}}\ (\text{kg/s})=\frac{\text{۱٫۲۵ m}^3\ \text{محلول}}{\text{min}}\left|\frac{\text{۱۰۳۰ kg}}{\text{m}^3\ \text{محلول}}\right|\frac{\text{۱ min}}{\text{۶۰ s}}=\text{۲۱٫۴۶ kg/s}$$

$$\Downarrow$$

$$\blacktriangle\quad x_{H_2SO_4}=\frac{q_{H_2SO_4}}{Q_{\text{کل}}}=\frac{\text{۱٫۰۲ kg } H_2SO_4/s}{\text{۲۱٫۴۶ kg/s}}=\boxed{\text{۰٫۰۴۸}\ \frac{\text{kg } H_2SO_4}{\text{kg محلول}}}$$

تمرین خلاقیت

راههایی را که برای اندازه‌گیری غلظت یك مادهٔ حل‌شده دریك محلول به‌فکرتان می‌رسد شماره‌گذاری کنید. (مثال: درصورتی‌که مادهٔ حل شده نور دارای طول موج ویژه‌ای را جذب می‌کند،دستهٔ پرتوی از این نور با این‌طول‌موج از محلول عبور دهید و جزءکسری جذب نور را اندازه بگیرید.)

۴

بنیادهای موازنه‌های مواد

در طرح فرایندی جدید یا تحلیل فرایندی موجود، محدودیتهایی توسط طبیعت اعمال می‌شود که باید آنها را به‌حساب آورد. برای مثال، نمی‌توانید درونداد رآکتوری را ۱۰۰۰ گرم سرب و خروجی آن را ۲۰۰۰ گرم سرب یا طلا یا هر چیز دیگری تعیین کنید؛ به‌همین ترتیب، اگر می‌دانیدکه درسوخت زغال سنگ مصرفی روزانهٔ دیگ بخار یك نیروگاه ۱۵۰۰ پوند گوگرد وجود دارد، برای فهمیدن اینکه روزانه ۱۵۰۰ پوند گوگرد به‌اشکال گوناگون کوره را ترك می‌کند، نیازی به‌تجزیهٔ خاکستر وگازهای دودکش دیگ بخار ندارید.

مبنای هردوی این مشاهدات قانون بقای جرم است که بیانگراین نکته است که جرم نه به‌وجود می‌آید ونه از بین می‌رود. (ما دراین کتاب کاری به واکنشهای هسته‌ای نداریم که برای آنها این قانون صادق نیست.) عبارات مبتنی برقانون بقای جرم نظیر «کل جرم برونداد = کل جرم درونداد» یا $\text{برونداد}(\text{روز}/\text{گوگرد } lb_m) = \text{درونداد}(\text{روز}/\text{گوگرد } lb_m)$ مثالهایی از **موازنه‌های جرم** و یا **موازنه‌های مواد** هستند. تا زمانی که صادق بودن دروندادها و برونددادهای کل فرایند و واحدهای جداگانه آن در معادله‌های موازنه‌های به‌کار رفته برای هر ماده فرایند ثابت نشود، طراحی فرایند جدید یا تحلیل فرایند موجود کامل نیست.

بخش دوم این کتاب که با این فصل آغاز می‌شود، روشهای کار نوشتن موازنه‌های مواد در واحدهای فردی فرایند و فرایندهای چند واحدی را مطرح می‌کند. ما در این

فصل، روشهای سازماندهی اطلاعات معلوم در مـورد متغیرهای فرایند، تنظیم معادله‌های موازنهٔ مواد وحل این معادلات برای متغیرهای مجهول را ارائه می‌کنیم. در فصلهای ۶ و ۷ خواص فیزیکی گوناگون وقوانین حاکم بررفتار مواد فرایند را معرفی کرده وچگونگی در نظرگرفتن این خواص و قوانین (همان‌گونه‌که باید باشند) در فرمولبندی موازنه‌های مواد را نشان می‌دهیم.

۴-۱ طبقه‌بندی فرایند

فرایندهای شیمیایی را می‌توان به صورت **ناپیوسته**، **نیم‌پیوسته** و **پیوسته** و **پایا** یا **گذرا** طبقه‌بندی‌کرد. پیش‌ازنوشتن موازنهٔ مواد پیرامون سیستم یك فرایند، باید بدانیدکه فرایند درکدامیك ازاین مقوله‌ها می‌گنجد.

۱. فرایند پیمانه‌ای (ناپیوسته). مـواد ورودی، درابتدای فرایند بـه سیستم وارد شده و محصولات،همگی پس از مدتی همزمان،تخلیه می‌شوند. درفاصله زمانی بین ورود مواد و خروج محصولات هیچ‌گونه جرمی از مرزهای سیستم وارد یا خارج نمی‌شود.
مثال: واکنش دهنده‌ها را به سرعت به یك مخزن اضافه کنید و مدتی بعد، هنگامی‌کـه سیستم به‌تعادل رسیده است، محصولات ومواد واکنش‌دهندهٔ مصرف‌نشده را تخلیه‌کنید.

۲. فرایند پیوسته. دروندادها و بروندادها به‌طورپیوسته درطول انجام فرایندجریان دارند.
مثال: مخلوطی ازمایعات را با جریان ثابتی به‌درون یك برج تقطیر تلمبه‌کنید و به‌طور مداوم جریان بخار ومایع را از بالا و پایین برج خارج‌کنید.

۳. فرایند نیم‌پیمانه‌ای. (فرایند نیم‌پیوسته نیز نامیده می‌شود). هـر فرایندی‌که پیمانه‌ای یا پیوسته نباشد.
مثالها: اجازه دهید محتویات یك ظرف گاز تحت فشار در فضا تخلیه شود؛ چند مایع را درمخزنی‌که چیزی ازآن تخلیه نمی‌شود، مخلوط‌کنید.

اگرمقادیرمتغیرهای فرایند (یعنی تمـام دماها، فشارها، حجمها و سرعت جریانها و نظایرآن)، به‌جز افت‌وخیز کوچکی پیرامون مقادیر یك میانگین ثابت،با زمان تغییرنکنند، گفته می‌شود که فرایند در **حالت پایا** کار می‌کند. فرایندهای ناپیوسته و نیم‌پیوسته ماهیتاً عملیات ناپایا هستند (چرا؟)، درحالی‌که فرایندهای پیوسته می‌توانند **به‌طور پایا** یا **گذرا** عمل کنند.

فرایندهای ناپیوسته در تولید کمیتهای کوچکی از محصول مـورد استفاده قـرار می‌گیرند درحالی‌که فرایندهای پیوسته برای تولیدکلان مناسبترند. فرایندهای پیوسته، تا حد امکان، نزدیك به حالت پایا مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند؛ شرایط ناپایا (گذرا) در هنگام راه‌اندازی و تغییرات بعدی ـ عمدی و غیرعمدی ـ در شرایط عمل فرایند وجود دارد.

خود را بیازمایید

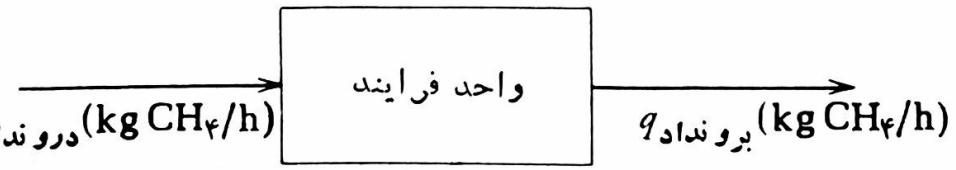
فرایندهای زیررا به‌صورت ناپیوسته(پیمانه‌ای)، پیوسته یا نیم‌پیوسته وحالت‌گذرا یا پایا طبقه‌بندی کنید.

۱. بالونی با سرعت جریان پایای دوگرم بردقیقه پر می‌شود.
۲. یك بطری پراز شیر از یخچال خارج شده و برروی میز آشپزخانه قرار می‌گیرد.
۳. آب در یك بالن درباز می‌جوشد.
۴. کربن مونوکسید و بخار آب با سرعت جریانهای پایا به داخل یك رآکتور لوله‌ای شکل وارد می‌شوند تا کربن دیوکسید و هیدروژن تولید شود. محصولها و مواد ترکیب نشده ازطرف دیگر رآکتور خارج می‌شوند.درآغاز راه‌اندازی، رآکتور پر از هواست ودمای رآکتورثابت است وترکیب نسبی وسرعت جریان واکنش‌دهنده‌های ورودی، مستقل از زمان است. فرایند را (الف) در آغاز، (ب) پس از زمانی طولانی از شروع فرایند، طبقه‌بندی کنید.

۴-۲ موازنه‌ها

۴-۲ (الف)- معادلهٔ عام موازنه

فرض کنیدکه متان جزء سازندهٔ جریانهای درونداد وبروندادیك‌واحد فرایند پیوسته باشد و نیزفرض کنید که درکوشش برای تعیین اینکه آیا کارآیی واحد همان کارآیی طراحی شده است یا نه، سرعت جریانهای جرمی متان در هردو جریان اندازه‌گیری شده و معلوم می‌شودکه متفاوت‌اند.



تنهاچهارتوضیح ممکن برای تفاوت مشاهده شده بین‌سرعت جریانهای اندازه‌گیری شده وجود دارد.

۱. متان از واحد نشت می‌کند.
۲. متان در واحد یا به عنوان یك واکنش دهنده مصرف می‌شود و یا به عنوان محصول، تولید می‌شود.
۳. متان در واحد انباشته می‌شود ـ احتمالاً توسط دیواره‌ها جذب می‌شود.
۴. اندازه‌گیریها غلط هستند.

اگر اندازه‌گیریها صحیح بوده و نشتی هم در واحد وجود نداشته باشد، احتمالات دیگر ـ تولید و یا مصرف متان در واکنش و انباشت در واحد فرایند ـ تماماً، ممکن است به تفاوت بین سرعت جریانهای درونداد و برونداد مربوط باشند.

موازنه (یاموجودی‌گیری) پیرامون ماده‌ای دریك سیستم (واحد منفردی ازفرایند،

مجموعهٔ واحدها یا کل فرایند) را می‌توان به‌صورت عام زیر نوشت:

انباشت	=	مصرف	—	برونداد	—	تولید	+	درونداد
(در داخل سیستم انبار می‌شود)		(در داخل سیستم مصرف می‌شود)		(از مرزهای سیستم خارج می‌شود)		(در داخل سیستم تولید می‌شود)		(از مرزهای سیستم وارد می‌شود)

(۴-۲-۱)

این **معادلهٔ عام موازنه** را می‌توان برای هر ماده‌ای که به‌هر واحد فرایند وارد یا از آن خارج می‌شود، نوشت: این معادله را می‌توان در مورد جرم کل مواد درون سیستم، یا گونه‌های مولکولی یا اتمی حاضر در فرایند به‌کار برد. معنی هرجمله‌ای ازاین معادله در مثال زیر توضیح داده می‌شود.

▼ مثال ۴-۲-۱ معادلهٔ موازنهٔ عام

سالانه ۵۰۰۰۰ نفر وارد شهری می‌شوند، ۷۵۰۰۰ نفراز آن خارج می‌شوند، ۲۲۰۰۰ نفر در آن متولد می‌شوند و ۱۹۰۰۰ نفر می‌میرند. موازنه‌ای پیرامون جمعیت این شهر بنویسید.

حل

فرض کنید P نشان دهندهٔ یك نفر باشد

$$\text{انباشت} = \text{مصرف} - \text{برونداد} - \text{تولید} + \text{درونداد}$$

$$50000\frac{P}{\text{yr}} + 22000\frac{P}{\text{yr}} - 75000\frac{P}{\text{yr}} - 19000\frac{P}{\text{yr}} = A\left(\frac{P}{\text{yr}}\right)$$

$$\Downarrow$$

$$A = -22000\frac{P}{\text{yr}}$$

(سالانه ۲۲۰۰۰ نفراز جمعیت شهر کاسته می‌شود.) ▲

موازنه‌ها را می‌توان به‌دو نوع نوشت:

۱. **موازنه‌های دیفرانسیلی** یا موازنه‌هایی که نشان می‌دهند دریك لحظه از زمان چه اتفاقی درسیستم رخ می‌دهد. بنابراین هرعبارتی ازمعادلهٔ موازنه‌به‌صورت **سرعت** است (سرعت درونداد، سرعت تولید، وغیره) و واحد آن عبارت است از واحدکمیت موازنه شده تقسیم بر واحد زمان (سال/نفر، $g\,SO_2/s$، روز/بشکه). این نوع ازموازنه معمولاً درمورد فرایندهای پیوسته به‌کار برده می‌شود. (مثال ۴-۲-۱ را ببینید.)

۲. موازنه‌های انتگرالی یـا موازنه‌هایی کـه اتفاقات بین دو لحظه از زمـان را توضیح می‌دهند. پس هـرعبارتی از معادلهٔ موازنه عبارت است از **مقدار** کمیت موازنه شده و واحد آن متناظر بـا واحدکمیت موازنه شده (نفر، gSO_2، بشکه) است. ایـن نوع موازنه معمولاً برای فرایندهای ناپیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند و دو لحظه زمانی آن عبارتند از لحظه‌ای بعد از ورود مواد به‌سیستم ولحظه‌ای قبل از خروج محصولات از سیستم.

ما دراین کتاب، در درجهٔ اول بـا موازنه‌های دیفرانسیلی به‌کار برده شده در مورد سیستمهای پیوستهٔ حالت پایا و موازنه‌های انتگرالی به‌کار برده شده در مـورد سیستمهای ناپیوسته بین حالتهای اولیه و نهایی آنها سروکار داریم. درفصل یازده موازنه‌های عـام پیرامون سیستمهایی بـا حالت ناپایا را در نظـر می‌گیریم و نشان می‌دهیم کـه چگونه موازنه‌های دیفرانسیلی و انتگرالی با یکدیگر مربوط‌اند ــ در حقیقت، چگونه یکـی را می‌توان از دیگری به‌دست آورد.

اگر کمیت موازنه شده، نه واکنش دهنده و نه محصولی از واکنش باشد، جمله‌های تولید و مصرف در معادله موازنه صفر خواهند بود. اگر کمیت موازنه شده، جرم کل سیستم باشد، این جملات همیشه برابرصفرخواهند بود (بجز در واکنشهای هسته‌ای)، زیرا جرم نه می‌تواند به‌وجود آید ونه می‌تواند از بین برود.

۴-۲ (ب)- موازنه‌های پیرامون فرایندهای پیوستهٔ حالت پایا

فرض کنیدکه هیدروژن درجریانهای درونداد و برونداد یك‌فرایند پیوستهٔ حالت‌پایا،وجود داشته باشد. جملهٔ انباشت در موازنهٔ پیرامون هیدروژن باید صفر باشد؛ اگر چنین نباشد، مقدارهیدروژن درسیستم با زمان تغییرکرده است وفرایند، طبق تعریف،درحالت پایا قرار ندارد. چنین استدلالی را می‌توان درمورد تمام اجسام موجود درفرایند به‌کار برد و به‌این ترتیب برای فرایندهای پیوستهٔ حالت پایا، معادلـهٔ عام موازنه، یعنی معادلهٔ ۴-۲-۱، به صورت زیرساده می‌شود

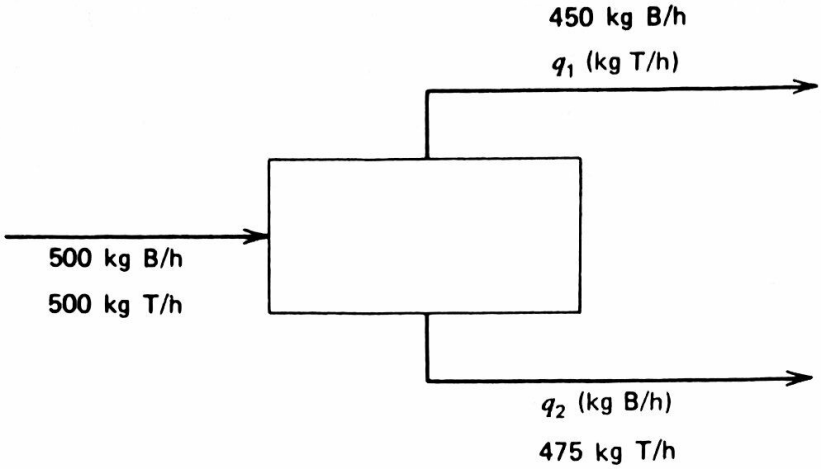
$$\boxed{\text{مصرف} + \text{برونداد} = \text{تولید} + \text{درونداد}} \qquad (۴-۲-۲)$$

▼ مثال ۴-۲-۲ موازنه‌های مواد پیرامون فرایند تقطیر پیوسته

یك هزار کیلوگرم برساعت از مخلوطی شامل تولوئن و بنزن که دارای ۵۰٪ وزنی بنزن است، دریك فرایند تقطیر به‌دو جزء تقطیرمی‌شود. سرعت جریان جرمی بنزن در جریـان خروجی از بالای برج ۴۵۰ kg B/h و سرعت جریان جرمی تولوئن درجریان خروجی از پایین برج ۴۷۵ kg T/h است. عملیات در حالت پایا انجـام می‌گیرد. موازنه‌های بنزن و تولوئن را برای محاسبهٔ سرعت جریانهای مجهول اجزاء در جریانهای برونداد، بنویسید.

حل

فرایند را به‌صورت نمودار اجمالی زیرمی‌توان نشان داد.



ازآنجاکه سیستم درحالت پایا قراردارد چیزی درسیستم ذخیره نمی‌شود وبنابراین جمله‌انباشت درتمام موازنه‌های مواد برابرصفراست. علاوه‌برآن، ازآنجاکه هیچ واکنش شیمیایی صورت نمی‌گیرد، جمله‌های تولید ومصرف نیز برابرصفرخواهند بود. بنابراین، معادلهٔ ۴–۲–۲ برای تمام موازنه‌ها به‌شکل سادهٔ برونداد = درونداد درمی‌آید.

موازنهٔ بنزن

$$۵۰۰\ \text{kg B/h} = ۴۵۰\ \text{kg B/h} + q_۲$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{q_۲ = ۵۰\ \text{kg B/h}}$$

موازنهٔ تولوئن

$$۵۰۰\ \text{kg T/h} = ۴۷۵\ \text{kg T/h} + q_۱$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{q_۱ = ۲۵\ \text{kg T/h}}$$

محاسبه را امتحان کنید:

موازنهٔ کل جرم

$$۱۰۰۰\ \text{kg/h} = ۴۵۰ + q_۱ + q_۲ + ۴۷۵\ (\text{kg/h همگی برحسب})$$

$$\Downarrow\ q_۱ = ۲۵,\ q_۲ = ۵۰$$

$$۱۰۰۰\ \text{kg/h} = ۱۰۰۰\ \text{kg/h} \quad ▲$$

۴-۲ (ج)- موازنه‌های انتگرالی پیرامون فرایندهای ناپیوسته

آمونیاك دریك راکتور ناپیوسته از ترکیب هیدروژن و نیتروژن تولید می‌شود. در زمان $t = 0$ مقدار m_0 mol NH_3 در راکتور موجود است و در زمان دیگر t_f، که واکنش پایان یافته ومحصولها خارج می‌شوند m_f mol آمونیاك در راکتور وجود دارد. درفاصلهٔ زمانی بین t_0 و t_f، آمونیاك از مرزهای راکتور وارد و یا ازآن خارج نمی‌شود، پس معادلهٔ عام موازنه (معادلهٔ ۴-۲-۱) به‌صورت انباشت = تولید درمی‌آید. علاوه‌بر آن، مقدار آمونیاکی که درفاصلهٔ زمانی بین t_0 و t_f در راکتور ذخیره می‌شود (انباشت می‌شود) برابر مقدار نهایی آن منهای مقدار اولیهٔ آن است و به صورت $m_f - m_0$ بیان می‌شود.

چنین استدلالی را می‌توان برای هرجسم شرکت‌کننده دریك فرایند ناپیوسته به‌کار برد ومعادلهٔ زیررا به‌دست آورد

درونداد اولیه — برونداد نهایی = انباشت = مصرف — تولید

یا

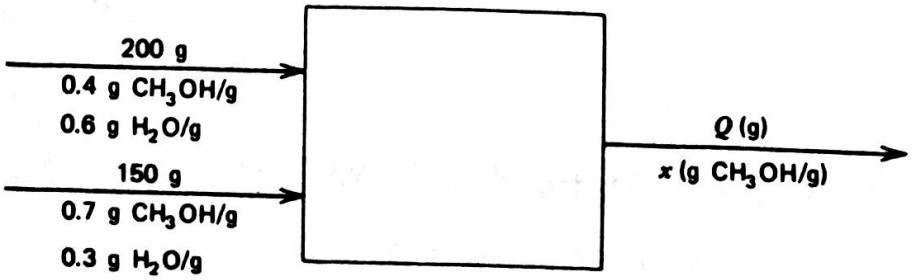
$$\boxed{\text{مصرف} + \text{برونداد نهایی} = \text{تولید} + \text{درونداد اولیه}} \qquad (۴-۲-۳)$$

این معادله شبیه به‌معادلهٔ ۴-۲-۲ است که برای فرایندهای پیوستهٔ حالت پایا مورد استفاده قرار می‌گیرد با این تفاوت‌که در این حالت، عبارات درونداد و برونداد نشان دهندهٔ مقادیراولیه و نهایی جسم موازنه شده است، نه سرعت جریانهای جسم موازنه شده در جریانهای پیوستهٔ تغذیه ومحصول.

▼ مثال ۴-۲-۳ موازنه‌های پیرامون یك فرایند اختلاط ناپیوسته

دومخلوط متانول-آب در دو بالون جداگانه قرار دارند. مخلوط اول دارای ۴۰٪ وزنی، ومخلوط دوم دارای ۷۰٪ وزنی متانول است. اگر ۲۰۰ g مخلوط‌اول با ۱۵۰ g مخلوط دوم ترکیب شوند، جرم و ترکیب محصول نهایی چه خواهد بود؟

حل



(مشاهده کنید که جریانهای درونداد و برونداد نمودار، نشان دهندهٔ حالتهای اولیه ونهایی این فرایند ناپیوسته هستند.)

ازآنجاکه هیچ واکنشی درسیستم صورت نمی‌گیرد، جمله‌های تولید و مصرف در معادلهٔ ۴–۲–۳ را می‌توان حذف کرد، به این ترتیب، همهٔ موازنه‌ها به شکل سادهٔ «درونداد = برونداد» درمی‌آیند.

موازنهٔ جرم کل

$$۲۰۰\,g + ۱۵۰\,g = Q(g)$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{Q = ۳۵۰\,g}$$

موازنهٔ متانول

$$\frac{۲۰۰\,g \mid ۰\text{ر}۴۰۰\,g\,CH_۳OH}{g} + \frac{۱۵۰\,g \mid ۰\text{ر}۷۰۰\,g\,CH_۳OH}{g} = \frac{Q(g) \mid x\,(gCH_۳OH)}{g}$$

$$\Downarrow Q = ۳۵۰$$

$$\boxed{x = ۰\text{ر}۵۲۹\,g\,CH_۳OH/g}$$

حال، همه چیز را دربارهٔ محصول، از جمله کسر جرمی آب (چقدر است؟) می‌دانیم. موازنهٔ آب فقط برای کنترل محاسبه به‌کار می‌رود.

موازنهٔ آب

برونداد = درونداد

$$(۲۰۰)(۰\text{ر}۶۰۰) + (۱۵۰)(۰\text{ر}۳۰۰) = (۳۵۰)(۱ - ۰\text{ر}۵۲۹)$$ (تحقیق کنید!)

$$\Downarrow$$

$$۱۶۵\,g\,H_۲O = ۱۶۵\,g\,H_۲O$$ ▲

۴-۳ محاسبات موازنهٔ مواد

تمام مسائل موازنهٔ مواد صورتهای مختلفی از یك موضوع هستند: مقادیر برخی ازمتغیرهای جریانهای درونداد و برونداد داده شده‌است، مقادیر دیگررا حساب کنید. حل چنین مسائلی نیازمند به‌دست‌آوردن وحل‌معادله‌هایی برای متغیرهای جریان مجهول‌است؛ حل معادله‌های به‌دست آمده معمولاً یك عملیات سادهٔ جبری است ولی به دست آوردن این معادله‌ها از توضیحات فرایند و مجموعه‌ای از داده‌های فرایند، مشکلات قابل توجهی را در بردارد. برای مثال، ممکن است که صورت مسئله روشن نسازدکه چه چیزی معلوم است وچه چیزی نیاز به‌محاسبه دارد واین برای دانشجویان غیرعادی نیست(مخصوصاً درامتحانات کوچك) که برای حل مسئله‌ای که احتیاج به ۵دقیقه وقت دارد، یك ساعت به‌مسئله خیره شده و سر خود را بخارانند.

دراین بخش، یك روش کار برای تبدیل توضیحات فرایند به‌مجموعه‌ای از معادله‌ها مطرح می‌شودکه می‌توان‌آنها را برای متغیرهای مجهول فرایند حل‌کرد. شیوهٔ برخوردی که مطرح می‌شود تنهاروش قانع‌کننده برای هجوم بـه مسئله‌های موازنهٔ مواد نیست، بلکه روش همیشه کارآمد ومؤثر برای کم‌کردن زمان خیره شدن و سرخاراندن است.

۴-۳-(الف)- نمودارهای جریان

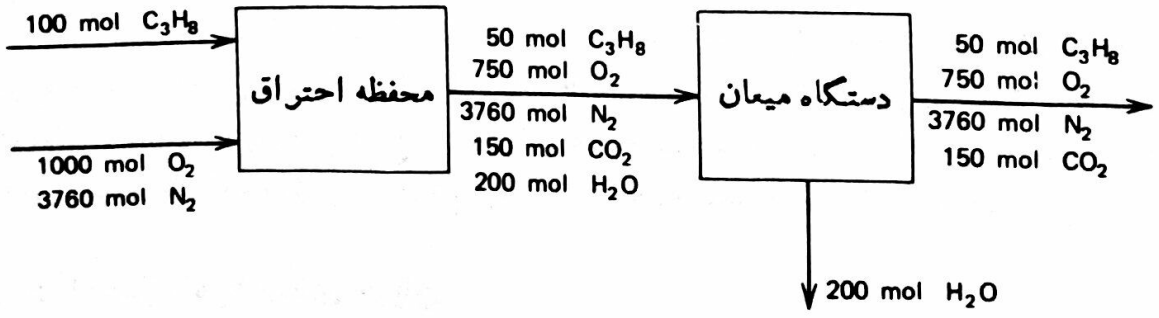
دراین‌کتاب و درسالهای آینده با متنهایی همانند متن زیر روبرو خواهید شد.

«هیدروژن‌دار شدن کاتالیزوری پروپان در راکتور پیوسته‌ای با بستر پر شده انجام می‌گیرد. یك هزار پوند در ساعت پروپان خالص به پیش گرمکنی وارد می‌شود و در آنجا قبل از ورود به راکتور تا دمای $670^{\circ}C$ گرم می‌شود. جریان گاز خروجی از راکتور که شامل گازهای پروپان، پروپیلن، متان و هیدروژن است از $800^{\circ}C$ به $110^{\circ}C$ سرد شده و سپس به برج جذب تغذیه می‌شوند، در آنجا، پروپان و پروپیلن در روغن حل می‌شوند. روغن حاصل سپس به‌یك برج جذب از مایع وارد شده و با گرم شدن در این برج، گازهای حل شده از آن خارج می‌شوند؛ این گازها متراکم شده و به ستون تقطیری با فشار زیاد فرستاده می‌شوند، و در این ستون پروپان و پروپیلن جدا می‌شوند. جریان پروپان به نقطهٔ تغذیه پیش‌گرمکن راکتور برگشت داده می‌شود. جریان محصول خروجی از برج تقطیر دارای ۹۸٪ پروپیلن و جریان برگشتی دارای ۹۷٪ پروپان است. روغن جدا شده از گازها نیز به برج جذب برگشت داده می‌شوند.»

هنگامی که شرح فرایندی نظیر فرایند بالا به‌شما داده شود و ازشما بخواهند که چیزی را دربارهٔ آن تعیین کنید، ضروری است که اطلاعات داده‌شده را به‌روشی که برای محاسبات بعدی مناسب باشد سازماندهی کنید. بهترین روش برای این‌کار، رسم **نمودار جریان** فرایند بااستفاده از بلوکها یانمادهای دیگر، به‌عنوان واحدهای فرایند (راکتورها، مخلوط کننده‌ها، واحدهای جداسازی ونظایر آنها)، وخطوط جهت‌دار، برای نشان دادن جریانهای ورودی و خروجی است.

برای‌مثال، فرض کنید گازی شامل O_2 و N_2 درمحفظهٔ احتراق ناپیوسته‌ای با پروپان ترکیب شود به‌طوری که مقداری از O_2 و C_3H_8 (نه تمام آنها) به H_2O و CO_2 تبدیل شوند و سپس محصول خنك شود و آب آن مایع گردد. نمودار جریان این فرایند دو واحدی را می‌توان همانند شکل ۴-۳-۱ نشان داد.

نمودار جریان کار یك فرایند، هنگامی که به‌طرز مناسبی مورد استفاده قرار گیرد، کمك شایانی به‌شروع و ادامهٔ محاسبات موازنهٔ مواد می‌کند. برای انجام این‌کار، بعد از رسم نمودار، باید مقادیرمتغیرهای معلوم ونمادهای متغیرهای مجهول فرایند برای هر یك از جریانهای ورودی و خروجی روی نمودار برچسب‌گذاری شود. پس ازآن، نمودار به مثابه تابلوی آگهی برای حل مسائل عمل می‌کند: با تعیین شدن هرمتغیرمجهول، مقدار آن در جای خود قرار می‌گیرد و به‌این ترتیب، نمودار همانند یك تابلو عمل می‌کند و نشان



شکل ۴-۳-۱ نمودار جریان فرایند احتراق-مایع شدن.

می‌دهد که حل مسئله در کدام مرحله است وچه کارهای دیگری باید انجام شود.

پیشنهادهای متعددی برای برچسب گذاری نمودارجریان فرایند به‌منظور بهره‌گیری هرچه بیشتراز آن درحل محاسبات موازنهٔ مواد ارائه شده است.

۱. مقادیر و واحدهای متغیرهای جریانهای معلوم را در محل جریانها بر روی نمودار یادداشت کنید. برای مثال، جریانی راکه شامل ۲۱٪ مولی O_2 و ۷۹٪ مولی N_2 با دمای ۳۲۰°C و فشار ۱٫۴ atm با سرعت جریان ۴۰۰ mol/h است به‌صورت زیرمی‌توان برچسب گذاری کرد

$$\xrightarrow{\text{۴۰۰ mol/h}}$$

۰٫۲۱ mol O_2/mol

۰٫۷۹ mol N_2/mol

$T = ۳۲۰°C,\ P = ۱٫۴ \text{ atm}$

با انجام دادن چنین کاری درمورد تمام جریانهای روی نمودار، خلاصه‌ای از تمام اطلاعات معلوم فرایند را دراختیار دارید که هرکدام ازاین اطلاعات دربخشی از فرایند قرار گرفته است که به‌آن مربوط است.

مهمترین متغیرهای جریان از نظرموازنهٔ مواد آنهایی هستندکه نشان می‌دهندکه چه مقدار از هر جزء در جریان وجود دارد (برای فرایندهای ناپیوسته) و یا سرعت جریان هر جزء (برای فرایندهای پیوسته) چقدر است.این اطلاعات به دو طریق داده می‌شوند: به‌صورت کل مقدار سرعت جریان وکسرهای هر جزء یا مستقیماً به صورت مقدار سرعت جریان هرجزء.

$$\xrightarrow{\text{۱۰۰ kmol/min}}$$

۶۰ kmol N_2/min

۴۰ kmol O_2/min

$\Longleftrightarrow$

۰٫۶ kmol N_2/kmol

۰٫۴ kmol O_2/kmol

$$\xrightarrow{\text{۱۰ } lb_m \text{ مخلوط}}$$

۳٫۰ lb_m CH_4

۴٫۰ lb_m C_2H_4

۳٫۰ lb_m C_2H_6

$\Longleftrightarrow$

۰٫۳ lb_m CH_4/lb_m

۰٫۳ lb_m C_2H_4/lb_m

۰٫۳ lb_m C_2H_6/lb_m

به‌محض اینکه جریان را به یکی از دو طریق فوق برچسب گذاری کردید، محاسبهٔ کمیتهای متناظر با روش دیگر آسان خواهد بود. (صحت این نکته را برای دومثال داده شده دربالا تحقیق کنید.)

۲. برای متغیرهای مجهول جریان، نمادهای جبری اختصاص دهید (نظیر Q(kg محلول)/min، n kmol C_3H_8، x lb$_m$ N_2/lb$_m$ و نظایر آن) و این نامها و واحدهای مربوط به آنها را روی نمودار بنویسید. برای مثال اگر در مثال مرحله ۱، سرعت جریان را نمی‌دانستید، جریان را به‌صورت زیر می‌توانستید برچسب گذاری کنید

Q(mol/h)

$\longrightarrow$

۰٫۲۱ mol O_2/mol

۰٫۷۹ mol N_2/mol

$T = ۳۲۰°C,\ P = ۱٫۴$ atm

در حالی که اگر سرعت جریان معلوم بوده ولی کسرهای مولی مجهول بودند، جریان به‌صورت زیر برچسب گذاری می‌شد

۴۰۰ mol/h

$\longrightarrow$

x (mol O_2/mol)

$1 - x$ (mol N_2/mol)

$T = ۳۲۰°C,\ P = ۱٫۴$ atm

سرانجام باید برای هرمجهول موجود در نمودار، معادله‌ای به‌دست آورد و آن را حل کرد، بنابراین، بهتر است که تعداد مجهولهای برچسب گذاری شده را در حداقل نگهدارید. برای مثال، هنگام برچسب گذاری کسرجرمی یا مولی جزئی از جریان؛ تعداد اسمها را یکی کمتر از تعداد کسرها انتخاب می‌کنیم، زیرا آخرین کسر برابر خواهد بود با یك منهای مجموع کسرهای دیگر، اگر معلوم باشد که جرم جریان ۲ دو برابر جرم جریان ۱ است، به‌جای Q_1 و Q_2، آن را به‌صورت Q و $2Q$ برچسب گذاری کنید؛ اگر بدانید که جرم نیتروژن در جریانی سه برابر جرم اکسیژن است، به‌جای به‌کار گیری x و y برای کسرجرمی O_2 و N_2، آن را به‌صورت x(g O_2/g) و $3x$(g N_2/g) برچسب گذاری کنید.

اگر سرعت جریان حجمی داده شده باشد، عموماً بهتر است که آن را مستقیماً برحسب سرعت جریان جرمی یا مولی برچسب گذاری کنید، زیرا، موازنه‌ها معمولاً براساس کمیتهای حجمی نوشته نمی‌شوند.

▼ مثال ۴-۳-۱ نمودار جریان کار یك فرایند رطوبت‌افزایی و اکسیژندارکردن هوا

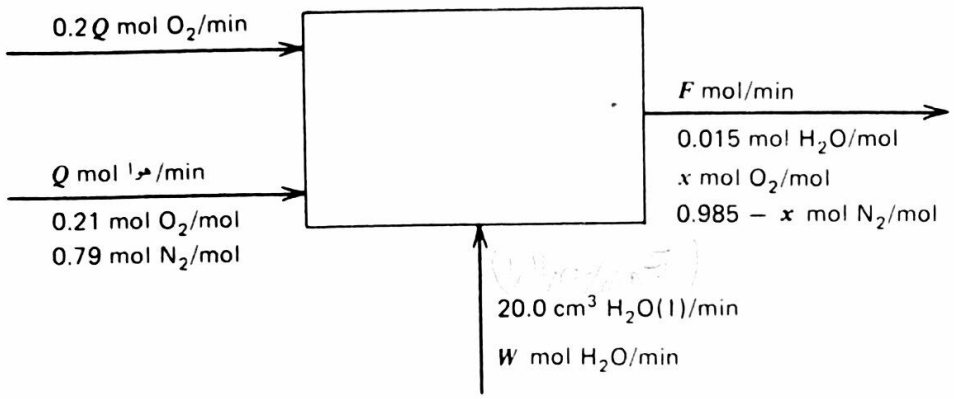
انجام آزمایشی در بارهٔ سرعت ارگانیسمهای معینی به‌محیطی با هوای مرطوب و غنی از

اکسیژن نیاز دارد. سه جریـان به محفظهٔ تبخیر تغذیه می‌شود تا جریانی بـا ترکیب نسبی مطلوب را ایجادکنند.

الف ـ آب مایع با سرعت جریان $20\ cm^3/min$ تغذیه می‌شود.
ب ـ هوا (۲۱٪ مولی O_2، بقیه N_2).
ج ـ اکسیژن خالص که سرعت جریان مولی آن برابر با یك‌پنجم سرعت جریان (ب) است.

بعد از تجزیهٔ گاز خروجی مشاهده می‌شود کـه این جریان دارای ۱٫۵٪ مولی آب است. نمودار جریان فرایند را رسم کرده و برچسب گذاری کنید و تمام متغیرهای مجهول جریان را حساب کنید.

حل



تذکراتی دربارهٔ این برچسب‌گذاری

۱. از آنجا کـه سرعت یکی از جریـانهای معلوم ($20\ cm^3 H_2O/min$) برمبنای یك دقیقه داده شده است، راحت‌تـر آن است کـه تمام سرعت جریـانهـا برهمین مبنا برچسب گذاری شود.
۲. به محض انتخاب نام Q برای سرعت جریـان هوا، با استفاده از اطلاعات داده شده دربـارهٔ نسبت سرعت جریانهای هوا واکسیژن، سرعت جریان O_2 را به‌صورت $0.2Q$ می‌توان برچسب گذاری کرد.
۳. مجموع کسرهای مولی اجزای یك جریان باید برابر یك باشد. از آنجاکه کسر مولی H_2O در جریـان خـروجی برابر ۰٫۰۱۵ داده شده است، بـا برچسب گـذاری کسر مـولـی O_2 بـه صـورت x، کسر مـولـی N_2 بـایـد بـه‌صـورت $1-(x+0.015)=(0.985+x)\ mol\ N_2/mol$ باشد.

کمیت W را می‌توان بـا استفاده از سرعت جریان حجمی و چگالی آب مایع حساب کرد.

$$W=\frac{۲۰۰\,\mathrm{cm^۳\,H_۲O}\mid ۱٫۰۰\,\mathrm{g\,H_۲O}\mid ۱\,\mathrm{mol}}{\mathrm{min}\mid \mathrm{cm^۳}\mid ۱۸٫۰۲\,\mathrm{g}}\Rightarrow \boxed{W=۱٫۱۱\,\frac{\mathrm{mol\,H_۲O}}{\mathrm{min}}}$$

سه مجهول باقیمانده (Q، F و x) را می‌توان به‌کمك موازنه‌ها تعیین کرد که برای این فرایند واکنش‌ناپذیر با حالت پایا به‌صورت برونداد = درونداد درمی‌آید. موازنه‌ها را به‌آسانی با مراجعه به‌نمودار جریان می‌توان نوشت.

موازنهٔ $H_۲O$

$$W\left(\frac{\mathrm{mol\,H_۲O}}{\mathrm{min}}\right)=F\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{min}}\mid \frac{۰٫۰۱۵\,\mathrm{mol\,H_۲O}}{\mathrm{mol}}$$

$$\Downarrow W=۱٫۱۱$$

$$\boxed{F=۷۴٫۱\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{min}}}$$

موازنهٔ مول کل

$$(۰٫۲Q+Q+W)\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{min}}=F\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{min}}$$

$$W=۱٫۱۱$$

$$\Downarrow\quad F=۷۴٫۱$$

$$\boxed{Q=۶۰٫۸\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{min}}}$$

موازنهٔ $N_۲$

$$\frac{Q\,\mathrm{mol}\mid ۰٫۷۹\,\mathrm{mol\,N_۲}}{\mathrm{min}\mid \mathrm{mol}}=\frac{F\,\mathrm{mol}\mid (۰٫۹۸۵-x)\,\mathrm{mol\,N_۲}}{\mathrm{min}\mid \mathrm{mol}}$$

$$\Downarrow$$

$$۰٫۷۹Q=F(۰٫۹۸۵-x)$$

$$Q=۶۰٫۸۰$$

$$\Downarrow\quad F=۷۴٫۱$$

$$\boxed{x=۰٫۳۳۷\,\mathrm{mol\,O_۲/mol}}$$

▲