

ترمودینامیک شیمیایی



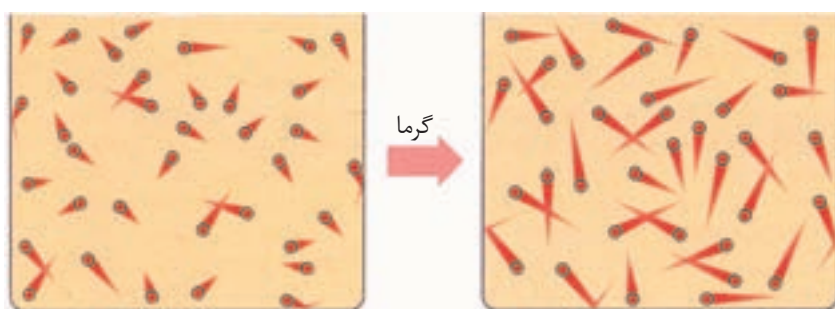
انرژی گرمایی و قابلیت آن برای تبدیل شدن به انرژی مکانیکی، پویایی به ارمغان آورده است.

سوختن نفت و زغال سنگ با آزاد شدن مقدار زیادی انرژی به صورت گرما همراه است که از این گرما می توان برای گرم کردن خانه، پختن غذا یا به حرکت درآوردن وسایط نقلیه استفاده کرد. شاید این گفته که: «یک لوکوموتیو بخار با سوزاندن چهارده گرم زغال سنگ می تواند دو تن بار را ۱۶۰۰ متر جابه جا کند!» تأکید کند که همواره برای انجام هر کاری به یک منبع انرژی نیاز داریم، اما مهم تر از آن یادآوری این نکته است که هر تغییر یا تغییرهایی (فیزیکی یا شیمیایی) که چنین نتیجه ای را در پی دارد، نمی تواند بدون مبادله ی انرژی میان مواد روی داده باشد. مطالعه ی کمی و کیفی انرژی گرمایی مبادله شده طی واکنش های شیمیایی، تغییر آن و تأثیری که بر حالت ماده دارد، موضوع هایی هستند که در شاخه ای از شیمی بررسی می شوند که **ترموشیمی** یا **گرماشیمی** نامیده شده است.

انرژی و ذره‌های سازنده‌ی ماده

می‌دانید که هر جسم در حال حرکت دارای انرژی جنبشی است. از آن جا که ذره‌های سازنده‌ی ماده یعنی اتم‌ها، مولکول‌ها یا یون‌ها نیز پیوسته در حرکتند، پس همه‌ی آن‌ها دارای انرژی جنبشی هستند. این گفته به این معناست که همه‌ی مواد انرژی دارند. در واقع انرژی آن‌ها مجموع انرژی ذره‌های سازنده‌ی آن‌هاست.

هم‌چنین می‌دانید که گرما صورتی از انرژی است. هنگامی که یک جسم گرم می‌شود، مقدار انرژی آن جسم تغییر می‌کند. در واقع طی این فرایند، انرژی جذب شده، در میان ذره‌های سازنده‌ی آن جسم توزیع می‌شود. پس می‌توان انتظار داشت که ذره‌های یادشده با سرعتی بیش‌تر از پیش به حرکت خود ادامه دهند، شکل ۱.



دمای پایین‌تر

دمای بالاتر

شکل ۱ ذره‌های تشکیل دهنده‌ی ماده پیوسته و به‌طور نامنظم در حرکت هستند. بر اثر گرم شدن، دمای جسم افزایش می‌یابد و بر سرعت حرکت ذره‌های سازنده‌ی آن افزوده می‌شود.

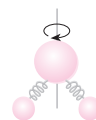
اگر دما را معیاری از میزان گرمی یک جسم تعریف کنیم، در این صورت با گرم شدن یک جسم دمای آن نیز بالا می‌رود. به بیان دیگر، دانستن دمای یک جسم اطلاعات سودمندی درباره‌ی انرژی جنبشی و سرعت حرکت ذره‌های سازنده‌ی آن جسم در اختیار ما می‌گذارد. بنابراین اختلاف دمای میان دو جسم، ما را از اختلاف در انرژی جنبشی ذره‌های تشکیل دهنده‌ی آن دو آگاه می‌سازد.

اکنون این پرسش به ذهن‌خطور می‌کند که این انرژی جنبشی، در ذره‌های سازنده‌ی یک ماده صرف چه می‌شود؟ آیا حرکت از جایی به جای دیگر (حرکت انتقالی) تنها حرکت ممکن برای ذره‌های ماده است؟

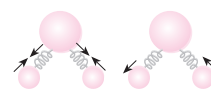
اگر دو گلوله‌ی آهنی سبک را به فنی متصل کرده آن‌ها را به سمت بالا پرتاب کنید، مجموعه‌ی یادشده حرکت‌های متفاوتی را از خود نشان خواهد داد. این مجموعه از یک نقطه به نقطه‌ی دیگری جابه‌جا می‌شود، یعنی دارای حرکت انتقالی است. به دور خود می‌چرخند، پس حرکت چرخشی هم دارند. هم‌چون فنر کشیده و جمع می‌شود یا به عبارتی به نوسان درمی‌آید، پس می‌توان گفت که مجموعه دارای حرکت ارتعاشی نیز هست. بنابراین برای ذره‌های تشکیل دهنده‌ی ماده هم، می‌توان حرکت‌های انتقالی، چرخشی و ارتعاشی در نظر گرفت.

حرکت‌های نامنظم ذره‌های سازنده‌ی یک ماده را حرکت‌های گرمایی می‌گویند.

نمایش حرکت چرخشی و ارتعاشی در یک مولکول سه اتمی (مولکول آب)



چرخش



ارتعاش

مشاهده‌های تجربی وجود چنین حرکت‌هایی را در ذره‌های سازنده‌ی ماده به اثبات رسانده است. همه‌ی این حرکت‌ها به انرژی نیاز دارد. بنابراین با افزایش دمای یک جسم، انرژی جذب شده توسط ذره‌ها، میان همه‌ی این حرکت‌ها توزیع می‌شود تا به این ترتیب هزینه‌ی اجرای آن‌ها تأمین شود. تجربه نشان می‌دهد که توزیع انرژی میان همه‌ی ذره‌های ماده یکسان نیست (چرا؟)، از این رو همواره میانگین انرژی همه‌ی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

ژول و کالری یکاهای

رایج انرژی هستند. ژول
یکای انرژی در سیستم SI
است و به افتخار جیمز ژول
فیزیک‌دان انگلیسی به این
نام خوانده می‌شود.

ژول یکای کوچکی

است، از این رو برای گزارش
مقادیر انرژی از کیلوژول
(kJ) که معادل هزار ژول
است استفاده می‌شود.

$$1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$$

هر تپش قلب انسان به
حدود 1 J انرژی نیاز دارد.
یک کالری مقدار
گرمای لازم برای افزایش
دمای یک گرم آب خالص به
اندازه‌ی یک درجه
سلسیوس است.

$$1 \text{ cal} = 4/184 \text{ J}$$

ظرفیت گرمایی معیاری
از میزان وابستگی تغییر
دمای یک جسم به مقدار
گرمای مبادله شده است.

مقدار گرمای مبادله شده =
تغییر دما \times ظرفیت گرمایی

دلتا، Δ ، یک حرف

یونانی است و برای
نشان دادن تغییر یک متغیر
مورد استفاده قرار می‌گیرد.
به عنوان مثال Δx به معنی
 $x_2 - x_1$ است.

آیا انرژی ماده به مقدار آن بستگی دارد؟

دو لیوان آب را در نظر بگیرید. یکی دارای ۱۰۰ mL و دیگری دارای ۲۰۰ mL آب است. دمای آب درون هر دو لیوان نیز یکسان و برابر ۲۵°C است. آیا برای افزایش دمای آب هر دو ظرف تا ۵۰°C، به انرژی یکسانی نیاز است؟

با کمک مفهومی به نام **ظرفیت گرمایی** می‌توان به این پرسش پاسخ داد. می‌دانید که ظرفیت گرمایی یک جسم، گرمای مورد نیاز برای افزایش دمای آن به اندازه‌ی یک درجه‌ی سلسیوس است. بنابراین هرچه مقدار ماده بیشتر باشد گرمای بیش‌تری نیز برای افزایش دمای آن به این اندازه لازم است.

به دلیل وابستگی ظرفیت گرمایی یک جسم به جرم آن، می‌توان با استفاده از ظرفیت گرمایی ویژه، این وابستگی را از بین برد. ظرفیت گرمایی ویژه مقدار گرمایی است که برای افزایش دمای یک گرم از جسم به اندازه‌ی یک درجه‌ی سلسیوس لازم است. ظرفیت گرمایی ویژه یک جسم را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد.

$$\text{مقدار گرمای مبادله شده} = \frac{\text{ظرفیت گرمایی}}{\text{جرم جسم}} = \frac{\text{تغییر دما} \times \text{جرم جسم}}{\text{ظرفیت گرمایی ویژه}}$$

در این رابطه اگر تغییر دما برابر یک درجه‌ی سلسیوس باشد و جرم جسم نیز یک گرم در نظر گرفته شود، در این صورت ظرفیت گرمایی ویژه‌ی جسم با مقدار گرمای مبادله شده برابر خواهد بود.

اگر مقدار گرمای مبادله شده را با q ، ظرفیت گرمایی ویژه را با c ، جرم جسم را با m و اختلاف دما را با ΔT نشان دهیم، آن‌گاه خواهیم داشت:

$$c = \frac{q}{m \cdot \Delta T}$$

در شیمی یکای ظرفیت گرمایی ویژه ژول بر گرم بر درجه‌ی سلسیوس ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) است. در جدول ۱ ظرفیت گرمایی ویژه‌ی برخی مواد داده شده است.

اگر دما برحسب کلون بیان شود، واحد ظرفیت گرمایی ویژه ژول بر گرم بر کلونین $(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$ است.

در شیمی بیش تر از **ظرفیت گرمایی مولی** استفاده می شود. ظرفیت گرمایی مولی، مقدار گرمای لازم برای افزایش دمای یک مول از ماده به اندازه ی یک درجه ی سلسیوس $(1^\circ C)$ است. یکای ظرفیت گرمایی مولی ژول بر مول بر درجه ی سلسیوس $(J \cdot mol^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ است.

جدول ۱ ظرفیت گرمایی ویژه ی برخی مواد در دمای اتاق $(25^\circ C)$

| ماده | حالت فیزیکی | ظرفیت گرمایی ویژه $(J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ | ظرفیت گرمایی مولی $(J \cdot mol^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ |
|---------------|-------------|--|--|
| آب (بخ) | جامد | ۲۱۰۷۶ | ۳۷۰۴۰ |
| سدیم کلرید | جامد | ۰/۸۵۰ | ۴۹۰۷۰ |
| کربن (گرافیت) | جامد | ۰/۷۲۰ | ۸۰۶۵ |
| آهن | جامد | ۰/۴۵۱ | ۲۵۰۱۹ |
| مس | جامد | ۰/۳۸۵ | ۲۴۰۴۶ |
| آب | مایع | ۴۰۱۸۴ | ۷۵۰۳۸ |
| اتانول | مایع | ۲۰۴۶۰ | ۱۱۳۰۳۳ |
| اتیلن گلیکول | مایع | ۲۰۳۹۰ | ۱۴۸۰۳۴ |
| آمونیاک | گاز | ۲۰۰۹۶ | ۳۵۰۷۰ |
| آب (بخار) | گاز | ۲۰۰۴۳ | ۳۶۰۸۰ |
| اکسیژن | گاز | ۰/۹۱۷ | ۲۹۰۳۴ |
| نیتروژن | گاز | ۱۰۰۴۰ | ۲۹۰۱۳ |
| هیدروژن | گاز | ۱۴۰۲۸۶ | ۲۸۰۸۰ |
| هلیوم | گاز | ۵۰۱۹۷ | ۲۰۰۸۰ |

ارزش غذایی مواد غذایی، برحسب کالری سنجیده می شود. ولی کارشناسان علوم تغذیه از نوعی کالری استفاده می کنند که آن را کالری رژیم غذایی (Cal) می نامند که حرف C در آن بزرگ است. این یکا معادل 1000 کالری یا یک کیلوکالری است.

$$1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal}$$

بنابراین وقتی که می گوئیم 100 گرم موز 70 کالری ارزش غذایی دارد به این معنی است که وقتی 100 گرم موز مصرف می شود 70 Cal یا 70 kcal انرژی برای بدن فراهم می کند.

ارزش غذایی 100 g از برخی مواد غذایی (Cal)

| | |
|-----|-----------|
| ۳۶۰ | برنج |
| ۱۴۰ | تخم مرغ |
| ۲۵۰ | نان |
| ۵۰ | سیب |
| ۷۰ | سیب زمینی |

نمونه ی حل شده

53 گرم آلومینیم به 239 J انرژی نیاز دارد تا دمای آن به اندازه ی $5^\circ C$ افزایش پیدا کند، ظرفیت گرمایی ویژه ی این فلز را محاسبه کنید.

پاسخ:

می دانید که ظرفیت گرمایی ویژه مقدار گرمایی است که برای افزایش دمای یک گرم از یک جسم به اندازه ی $1^\circ C$ لازم است. از آن جا که دادن 239 J انرژی دمای 53 g آلومینیم را به اندازه ی $5^\circ C$ افزایش می دهد، مقدار گرمایی معادل $4/51 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ $(\frac{239 \text{ J}}{53 \text{ g}})$ لازم است تا دمای 1 g آلومینیم را $5^\circ C$ افزایش دهد. به این ترتیب گرمای لازم برای افزایش دمای 1 g آلومینیم به اندازه ی $1^\circ C$ برابر خواهد بود با

$$\left(\frac{4/51 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}}{5^\circ C}\right) = 0/902 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$$

به عبارت دیگر:

$$\text{ظرفیت گرمایی ویژه ی آلومینیم} = \frac{239\text{J}}{53\text{g} \times 5^\circ\text{C}} = 0.902 \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

خود را بیازمایید

۱. اگر افزایش دمای ۷۵g سرب به مقدار 1°C به ۹۶J گرما نیاز داشته باشد، ظرفیت گرمایی ویژه و ظرفیت گرمایی مولی سرب را محاسبه کنید.
۲. برای کاهش دمای ۲۵۰g اتانول از دمای 25°C به دمای 3°C چه مقدار گرما باید از آن گرفته شود؟

اطلاعات جمع آوری کنید

ظرفیت گرمایی ویژه ی آب در سه حالت جامد، مایع و گاز با هم تفاوت دارد. آیا می توان نتیجه گرفت که حالت فیزیکی هم بر مقدار ظرفیت گرمایی ویژه ی یک ماده مؤثر است؟ این وابستگی را چگونه می توان توجیه کرد؟ با مراجعه به منابع علمی معتبر ضمن ارایه ی چند نمونه ی دیگر پاسخ این پرسش ها را بیابید و نتیجه را در کلاس ارایه کنید.

بیش تر بدانید

هزاران سال است که در کشورهای شرق آسیا مراسم شگفت انگیز راه رفتن روی زغال گداخته برگزار می شود. افرادی روی زغال داغ راه می روند، بدون آن که دچار سوختگی شوند. چگونه این کار امکان پذیر است؟ آیا این افراد قدرت فراطبیعی دارند؟ یا این که علم تجربی توجیهی برای آن ندارد؟ پاسخ این پرسش ها را می توان با بررسی ظرفیت گرمایی پوست کف پا و زغال گداخته یافت. چون بافت بدن انسان به طور عمده از آب تشکیل شده است، از این رو پوست کف پا ظرفیت گرمایی ویژه ی نسبتاً بالایی دارد. بنابراین، برای آن که دمای پاها به طور قابل ملاحظه ای تغییر کند، باید مقدار زیادی انرژی از زغال به این اندام ها منتقل شود. چون مدت زمان تماس پاها با زغال گداخته نسبتاً کوتاه است، فرصت چندانی برای انتقال انرژی به پاها وجود ندارد، به طوری که دمای کف پاها آن چنان افزایش نمی یابند که آسیبی ببینند.

از سوی دیگر، اگر چه دمای سطح زغال زیاد است، اما لایه ی گداخته ی سطح آن بسیار نازک است. از این رو، مقدار انرژی موجود برای گرم کردن پاها کم تر از آن است که انتظار می رود. زیرا اگرچه دمای این لایه ی گداخته ی بسیار نازک زیاد است، اما جرم آن به اندازه ای ناچیز است که گرمای قابل ملاحظه ای برای

مبادله در اختیار ندارد.

عامل سومی که به این افراد کمک می‌کند تا بتوانند روی زغال گذاشته راه بروند، پدیده‌ای است که نخستین بار یک فیزیک‌دان آلمانی به نام یوهان لیدن فراست به آن پی برد. اثر لیدن فراست به پدیده‌ای گفته می‌شود که به قطره‌های آب اجازه می‌دهد روی یک جسم داغ (مانند یک ماهی‌تابه‌ی داغ) برای مدت نسبتاً طولانی بلغزند، بدون آن‌که تبخیر شوند. علت این پدیده آن است که ناحیه‌ای از قطره که در تماس با سطح داغ قرار دارد، تبخیر شده و لایه‌ای از گاز (بخار) به وجود می‌آید. این لایه مانع از انتقال گرما به بقیه‌ی قطره می‌شود و به قطره امکان می‌دهد تا برای مدت بیش‌تری روی سطح داغ باقی بماند. قطره‌های عرق پای این افراد نیز همین اثر را دارد. افزون بر این، چون این مراسم معمولاً در شب اجرا می‌شود، چمن مرطوبی که در اطراف بستر زغال وجود دارد، پای شخص را نمناک کرده، رطوبت لازم برای پدیده‌ی لیدن فراست را فراهم می‌کند. بنابراین، اگرچه راه رفتن روی آتش، کار شگفت‌آوری به نظر می‌رسد، اما دلایل علمی محکمی وجود دارد که امکان انجام این کار را توجیه می‌کند. البته، تمرین کافی و بستر مناسب زغال نیز ضروری است. ضمن آن که نباید از تحلیل‌های روانشناسانه‌ی چنین اقدامی نیز چشم‌پوشی کرد.



مراسم راه رفتن روی زغال گذاشته. هندوهای جزایر فیجی در حال برگزاری این مراسم دیده می‌شوند.

ترمودینامیک چیست؟

تا این جا آموختید که ماده انرژی دارد و این انرژی میان همه‌ی ذره‌های سازنده‌اش آن هم به طور غیریک‌نواخت توزیع شده است. هم‌چنین آموختید که هر ماده می‌تواند به مقادیر معین و قابل‌اندازه‌گیری انرژی جذب کند یا از دست بدهد و در یک کلام انرژی مبادله کند. این ویژگی‌های ماده و بسیاری دیگر از این دست در شاخه‌ای از علم تجربی مطالعه می‌شود که **ترمودینامیک** نامیده شده است. ترمودینامیک را می‌توان دانش مطالعه‌ی تبدیل شکل‌های مختلف انرژی و راه‌های انتقال آن تعریف کرد. ترمودینامیک نیز مانند هر شاخه‌ی علمی دیگری الفبای ویژه‌ی خود را دارد. پس لازم است پیش از ورود به این بحث با برخی مفاهیم اولیه‌ی ترمودینامیک آشنا شوید.

سامانه و محیط پیرامون آن

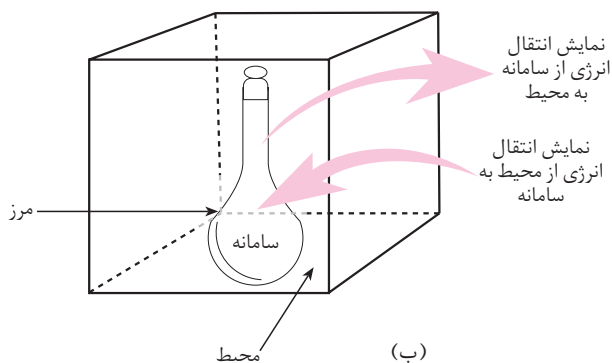
در ترمودینامیک بخشی از جهان را انتخاب و تغییر انرژی آن را مطالعه می‌کنند. به بخشی از جهان که برای مطالعه انتخاب می‌شود، **سامانه** یا **سیستم** می‌گویند. هنگامی که سامانه مشخص شد، هر چیز دیگری که در پیرامون آن باشد **محیط** نامیده می‌شود. در شکل ۲ یک سامانه و محیط پیرامون آن را می‌بینید. در این شکل، سامانه، محتویات بالون حجمی (محلول زرد) است و وسایل دیگر و هم‌چنین بقیه‌ی قسمت‌های آزمایشگاه محیط پیرامون سامانه را تشکیل می‌دهند. در حقیقت، بقیه‌ی جهان هستی محیط پیرامون سامانه است ولی در عمل

کافی است که فقط بخشی از جهان که با سامانه در ارتباطی نزدیک است محیط در نظر گرفته شود.

دیواره‌ای که سامانه را از محیط پیرامون آن جدا می‌کند **مرز سامانه** نامیده می‌شود. این مرز ممکن است حقیقی یا مجازی باشد.



(آ)



(ب)

شکل ۲ سامانه و محیط پیرامون آن آ. وقتی که محتویات بالون (محللول زرد) را به عنوان سامانه در نظر بگیریم، دیواره‌ی بالون مرز سامانه و آزمایشگاه محیط پیرامون آن به شمار می‌آید. ب. نمایش دقیق‌تر اجزای سامانه‌ی یاد شده.

انواع سامانه‌ها

سامانه‌ها را براساس نوع مبادله‌ای که با محیط پیرامون خود دارند به سه دسته طبقه‌بندی می‌کنند. در این مبادله سامانه و محیط می‌توانند انرژی، ماده یا هر دو را بین هم تبادل کنند. سامانه‌ای که هم انرژی و هم ماده با محیط مبادله می‌کند **سامانه‌ی باز** نامیده می‌شود. به سامانه‌ای که در آن امکان مبادله‌ی ماده وجود ندارد و تنها به مبادله‌ی انرژی اکتفا می‌شود، **سامانه‌ی بسته** می‌گویند. سامانه‌ای هم که مبادله‌ی ماده و انرژی ندارد **سامانه‌ی منزوی (ایزوله)** نامیده شده است.

فکر کنید

۱- با توجه به تعریف انواع سامانه‌ها، در هر مورد تعیین کنید که سامانه‌ی داده شده از نوع باز یا بسته است.

آ. یک زودپز حین پختن غذا

ب. یک بادکنک پر از هوا

۲- آب جوش یا چایی که در یک فلاسک نگه‌داری می‌شود، در مجموع یک سامانه‌ی

منزوی را تشکیل می‌دهد. آیا می‌توان ادعا کرد که این سامانه واقعاً منزوی است؟

خواص سامانه

برای توصیف یک سامانه باید مقادیر برخی از خواص قابل اندازه‌گیری آن برای نمونه حجم، فشار و دمای سامانه را اندازه‌گیری کرد. چنین خواصی را **خواص ترمودینامیکی** آن سامانه می‌گویند. این خواص به دو دسته‌ی **خواص مقداری و خواص شدتی** دسته‌بندی می‌شوند.

فکر کنید

۳۵۰ mL از یک محلول آبی رنگ با غلظت $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ در یک بشر موجود است (سامانه‌ی اولیه). این محلول را به ترتیب در سه بشر به حجم‌های 50° ، 100° و 200° میلی لیتر می‌ریزیم. جرم، حجم، دما، غلظت، رنگ، چگالی و ظرفیت گرمایی محلول یاد شده در این سه بشر در مقایسه با بشر اولیه چه تفاوتی کرده است؟ جمع کدام خاصیت برای این سه بشر با همین خاصیت در سامانه‌ی اولیه برابر است؟

اگر خواصی را که مقدار آن‌ها به مقدار ماده وابسته است، خواص مقداری و خواصی را که مقدار آن‌ها به مقدار ماده بستگی ندارد، خواص شدتی بنامیم، از میان خاصیت‌های بیان شده، کدام خاصیت سامانه‌ی اولیه شدتی و کدام مقداری خواهد بود؟

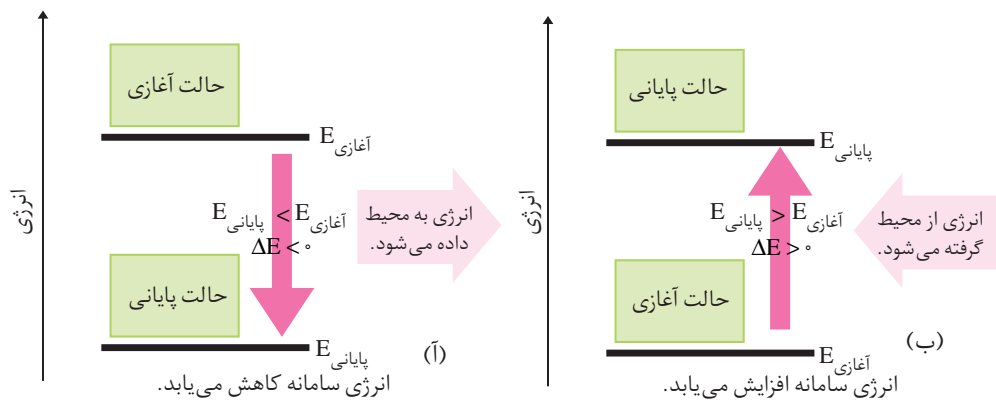
جاری شدن انرژی در سامانه

اگر یک سامانه را شامل شمار بسیار زیادی ذره در نظر بگیریم در این صورت چون هر ذره‌ی موجود در این سامانه دارای انرژی جنبشی و پتانسیل است، مجموع این انرژی‌ها برای همه‌ی ذره‌های تشکیل دهنده‌ی سامانه **انرژی درونی** آن سامانه نامیده می‌شود. هنگامی که در یک سامانه‌ی شیمیایی (مثلاً بالون موجود در شکل ۲) مواد اولیه یا واکنش دهنده‌ها به فراورده‌ها تبدیل می‌شود، انرژی درونی آن سامانه تغییر می‌کند. اگر این تغییر انرژی را با ΔE نشان دهیم برای محاسبه‌ی آن باید اختلاف بین انرژی درونی سامانه پیش و پس از وقوع تغییر اندازه‌گیری شود:

$$\Delta E = E_{\text{پایانی}} - E_{\text{آغازی}} = E_{\text{فراورده‌ها}} - E_{\text{واکنش دهنده‌ها}}$$

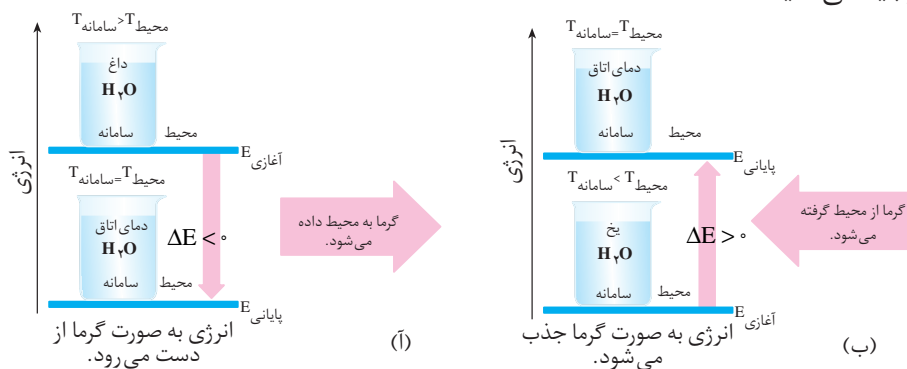
$E_{\text{پایانی}}$ نشان دهنده‌ی انرژی پس از تغییر و $E_{\text{آغازی}}$ نشان دهنده‌ی انرژی پیش از تغییر است. معمولاً، تغییر انرژی سامانه را با نموداری نمایش می‌دهند که در آن $E_{\text{پایانی}}$ (انرژی فراورده‌ها) و $E_{\text{آغازی}}$ (انرژی واکنش دهنده‌ها) خطوط افقی هستند و انرژی روی محور عمودی قرار دارد. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۳. آ سامانه‌ای را نشان می‌دهد که در آن با انتقال انرژی از سامانه به محیط،



شکل ۳ نمودار تغییر انرژی در یک سامانه. این نمودارها انتقال انرژی را بین یک سامانه و محیط پیرامون آن نشان می‌دهد.

انرژی درونی سامانه کاهش می‌یابد. در این شرایط ΔE سامانه منفی است. شکل ۳. ب سامانه‌ای را نشان می‌دهد که انرژی درونی آن در حال افزایش یافتن است، یعنی از محیط پیرامون به سامانه انرژی وارد می‌شود و علامت تغییر انرژی درونی سامانه مثبت است. در سامانه‌ی ۳. آ سطح انرژی فرآورده‌ها از سطح انرژی واکنش دهنده‌ها پایین‌تر است. در حالی که در سامانه‌ی ۳. ب سطح انرژی فرآورده‌ها از سطح انرژی واکنش دهنده‌ها بالاتر است. فرض کنید که یک سامانه شامل نمونه‌ای آب داغ درون یک ظرف سربسته باشد، در این صورت گرما از آب به محیط پیرامون منتقل می‌شود و انرژی سامانه کاهش می‌یابد، شکل ۴. آ. در این حالت، تغییر انرژی درونی سامانه فقط ناشی از مبادله‌ی گرما است و این مبادله‌ی انرژی تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای آب با دمای محیط پیرامون آن برابر شود. چون در این مورد، انرژی سامانه کاهش پیدا می‌کند. یعنی سامانه بخشی از انرژی خود را از دست داده است، پس علامت تغییر انرژی درونی آن منفی است. شکل ۴. ب نمودار انرژی را برای سامانه‌ی دیگری نشان می‌دهد. علامت تغییر انرژی درونی را در این سامانه چگونه توجیه می‌کنید؟



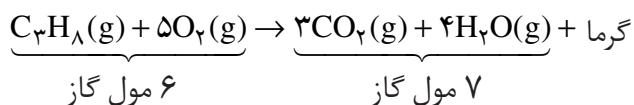
شکل ۴ سامانه‌ی بسته‌ای که فقط با محیط مبادله‌ی گرما دارد. آ. آب گرم (سامانه‌ی بسته) انرژی را به صورت گرما به محیط پیرامون منتقل می‌کند تا زمانی که دمای آن با دمای محیط پیرامون یکسان شود. ب. یخ از محیط پیرامون انرژی جذب می‌کند تا زمانی که دمای آن با دمای محیط پیرامون یکسان شود.

به طور خلاصه، اگر گرما از سامانه به محیط پیرامون منتقل شود، علامت گرما منفی و اگر گرما از محیط پیرامون به سامانه منتقل شود، علامت گرما مثبت است. اگر انرژی درونی سامانه کاهش پیدا کند، علامت آن منفی و اگر انرژی درونی سامانه افزایش یابد، علامت آن مثبت است.

انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

به یک مثال ساده توجه کنید. فرض کنید که شما بخواهید از طبقه ی اول یک ساختمان به طبقه ی دهم بروید. برای این منظور ممکن است که شما از پله استفاده کنید یا با استفاده از آسانسور بالا بروید. انتخاب هر کدام از این مسیرها در هدف نهایی شما اثری ندارد. یعنی در هر حالت انرژی آغازی و پایانی شما تفاوتی نمی کند و بنابراین میزان تغییر انرژی یکسان است. تغییر انرژی درونی یک سامانه هم، به مسیر انجام فرایند بستگی ندارد و فقط به حالت آغازی و پایانی سامانه وابسته است. از این رو، انرژی درونی را **تابع حالت** می گویند. به این معنا که اگر برای انجام فرایندی مسیرهای متفاوتی وجود داشته باشد، تغییر انرژی درونی سامانه در تمام مسیرها یکسان است.

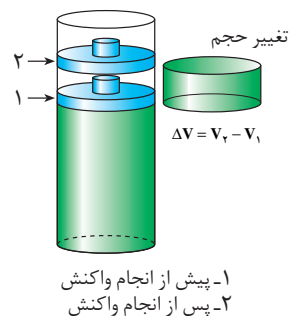
واکنش پروپان و اکسیژن را در نظر بگیرید. فرض کنید که این واکنش در سیلندری با یک پیستون متحرک انجام می شود، شکل ۵. انرژی درونی آغازی را نیز هم ارز انرژی درونی واکنش دهنده ها فرض کنید. با توجه به معادله ی موازنه شده ی زیر طی این واکنش از ۶ مول واکنش دهنده ۷ مول فراورده به دست می آید. ضمن آن که مقدار قابل توجهی گرما نیز آزاد می شود.



همان گونه که مشاهده می شود حجم فراورده ها بیش از حجم واکنش دهنده ها است. ($\Delta V > 0$) این افزایش حجم سبب می شود که پیستون به سمت بالا حرکت کند. در واقع پیستون که پیش از این نیز فشار هوا را در برابر خود داشت، اکنون با انرژی بیش تری مولکول های هوا را به عقب می راند و در واقع روی آن ها کار انجام می دهد. به سخن دیگر، مقداری از انرژی واکنش به صورت انرژی مکانیکی نمایان شده است.

همان طوری که دیدید، در این مثال تغییر انرژی درونی هم ارز گرمای مبادله شده با محیط نیست. زیرا مقداری از این گرما به کار تبدیل شده است. اگر تغییر انرژی درونی را با ΔE ، گرمای مبادله شده را با q و کار انجام شده ناشی از تغییر حجم را با w نشان دهیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$\Delta E = q + w$$



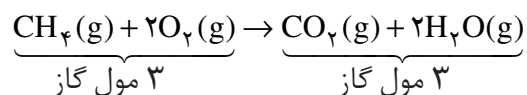
۱- پیش از انجام واکنش
۲- پس از انجام واکنش

شکل ۵ فشار درون سیلندر به دلیل افزایش حجم فراورده های واکنش پروپان و اکسیژن بیش از فشار محیط است. بنابراین گازهای درون سیلندر روی محیط کار انجام می دهند. به خاطر داشته باشید که این واکنش در فشار ثابت انجام می شود.

این رابطه قانون اول ترمودینامیک را معرفی می کند. این قانون در واقع همان قانون پایستگی انرژی است. بر طبق این قانون انرژی نه به وجود می آید و نه از بین می رود بلکه از شکلی به شکل دیگری درمی آید.

گاهی ممکن است که طی یک واکنش شیمیایی تغییر حجمی ایجاد نشود، یعنی $\Delta V = 0$ باشد، در این صورت $w = 0$ است.

واکنش سوختن متان را در همان ظرف در نظر بگیرید:

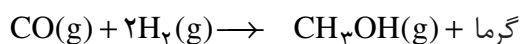


۳ مول از واکنش دهنده ها ۳ مول فراورده تولید می کند، پس $\Delta V = 0$ است. در این جا کار ناشی از تغییر حجم نیز صفر خواهد بود.

در این حالت $\Delta E = q$ است. به عبارت دیگر هنگامی که یک واکنش شیمیایی با تغییر حجم همراه نیست یا در ظرفی با حجم ثابت انجام می گیرد، مقدار تغییر انرژی درونی تنها ناشی از انتقال گرما خواهد بود.

فکر کنید

واکنش زیر را در نظر بگیرید.



فرض کنید که این واکنش در سیلندری با یک پیستون متحرک (واکنش در فشار ثابت) انجام می گیرد. در این صورت علامت تغییر انرژی درونی (ΔE) برای این واکنش چگونه خواهد بود؟

واکنش های شیمیایی به دو روش انجام می شود:

واکنش در حجم ثابت و واکنش در فشار ثابت

ا. واکنش در حجم ثابت ($\Delta V = 0$)؛ در چنین حالتی بر اثر تغییر حجم کاری انجام نمی شود ($w = 0$) و تغییر انرژی درونی سیستم فقط ناشی از مبادله ی گرما است.

بنابراین می توان نوشت:

تغییر انرژی درونی $E \Delta = q_v$ گرمای مبادله شده برای واکنش در حجم ثابت

ب. واکنش در فشار ثابت ($\Delta V \neq 0$)؛ این واکنش در ظرفی سرباز یا هر ظرف دیگری انجام می شود که با تغییر حجم، فشار را ثابت نگه می دارد. در این حالت کار انجام می شود ($w \neq 0$). پس در این حالت، تغییر انرژی درونی با انجام کار و مبادله ی گرما همراه

مقدار w می تواند منفی یا مثبت باشد. مقدار آن هنگامی منفی است که سامانه روی محیط کار انجام دهد. ولی در شرایط معکوس که محیط روی سامانه کار انجام می دهد w مقداری مثبت است.

است. اگر گرمای منتقل شده در فشار ثابت را با q_p نشان دهیم در آن صورت:

$$\Delta E = q + w \xrightarrow[\text{در فشار ثابت}]{\text{انجام واکنش}} q_p = \Delta E - w$$

چون بیش تر واکنش های شیمیایی در فشار ثابت انجام می شود، برای چنین واکنش هایی گرمای مبادله شده در فشار ثابت (q_p) را با نماد ΔH نشان می دهند و آن را **گرمای واکنش یا آنتالپی واکنش** می نامند.

$$q_p = \Delta H$$

بیش تر بدانید

پدیده های زیادی در زندگی روزانه وجود دارد که آن ها را می توان به کمک قانون اول ترمودینامیک توجیه کرد. تولید برف ساختگی برای پیست های اسکی از جمله این پدیده ها است. چگونه می توان برای رفع نیاز اسکی بازان در روزهای آفتابی به این اندازه برف تهیه کرد؟ راز تهیه ی برف ساختگی در معادله ی $\Delta E = q + w$ نهفته است. دستگاه سازنده ی برف دارای هوای فشرده و بخار آب با فشار ۲۰ اتمسفر است. چون تفاوت فشار بین مخزن دستگاه و هوای بیرون زیاد است، وقتی مخلوط در هوا پاشیده می شود، به سرعت انبساط می یابد، به طوری که تقریباً هیچ تبادل گرمایی بین سامانه (هوا و آب) و محیط اطراف صورت نمی گیرد؛ یعنی، $q = 0$ است. (در ترمودینامیک، چنین فرایندی را *فرایند بی دررو* می نامند.) از این رو، می توان نوشت:

$$\Delta E = q + w = w$$

چون این سامانه روی محیط کار انجام می دهد، مقدار w منفی است و انرژی آن کاهش می یابد. انرژی جنبشی بخشی از کل انرژی این سامانه است. چون انرژی جنبشی متوسط یک گاز با دمای آن نسبت مستقیم دارد، بنابراین تغییر انرژی متناسب با تغییر دما خواهد بود. بنابراین:

$$\Delta E \propto \Delta T \Rightarrow E = C\Delta T$$

در این رابطه C ثابت تناسب است. چون ΔE منفی است، ΔT نیز باید منفی باشد. این اثر که اثر سرد کردن نامیده شده است، موجب کاهش انرژی جنبشی مولکول های آب و تشکیل برف می شود. اگر چه برای تهیه ی برف تنها به آب نیاز است، اما حضور هوا که آن نیز بر اثر انبساط سرد می شود، به کاهش دمای بخار آب کمک شایانی می کند.

برای واکنش هایی که تنها از مواد جامد و مایع تشکیل شده اند ΔV بسیار ناچیز است. از این رو برای این واکنش ها مقدار ΔE را تقریباً با ΔH برابر در نظر می گیرند.



یک دستگاه سازنده ی برف

آنتالپی یک تابع حالت است.

همان طوری که گفته شد برای بررسی تغییر انرژی در واکنش های شیمیایی که اغلب در فشار ثابت روی می دهند از کمیت ترمودینامیکی دیگری به نام آنتالپی (H) استفاده

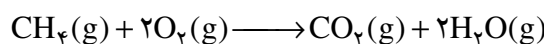
می شود در واقع آنتالپی را می توان تغییر انرژی یک سامانه در فشار ثابت تعریف کرد. در این شرایط مبادله ی انرژی با انجام کار توسط سامانه روی محیط پیرامون یا برعکس همراه است. بنابراین اغلب میزان تغییر آنتالپی با تغییر انرژی درونی تفاوت داشته، کم تر یا بیش تر از آن است. آنتالپی هم مانند انرژی درونی، یک تابع حالت است و مقدار تغییر آن فقط به حالت های آغازی و پایانی فرایند بستگی دارد. برای یک فرایند تغییر آنتالپی (ΔH) به صورت زیر است:

$$\Delta H = H_{\text{پایانی}} - H_{\text{آغازی}}$$

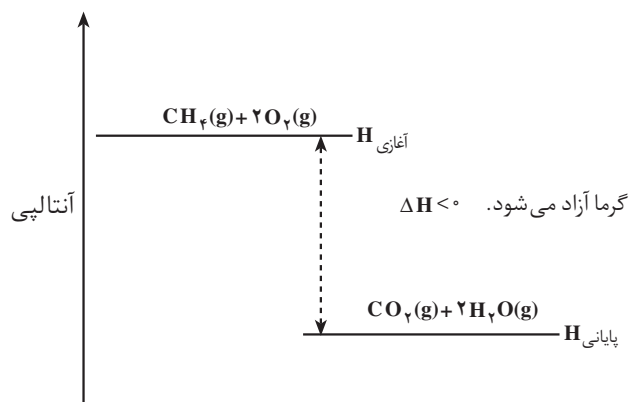
اگر سامانه ی مورد نظر یک واکنش شیمیایی باشد، در آن صورت $H_{\text{پایانی}}$ آنتالپی فرآورده ها و $H_{\text{آغازی}}$ آنتالپی واکنش دهنده ها است و ΔH آنتالپی واکنش نامیده می شود. یعنی:

$$\Delta H_{\text{واکنش}} = H_{\text{فرآورده ها}} - H_{\text{واکنش دهنده ها}}$$

به عنوان نمونه واکنش زیر را در نظر بگیرید:



این واکنش یک واکنش سوختن است و گرما آزاد می کند. همان طور که می دانید به این نوع واکنش ها **گرما ده** می گویند. ΔH برای چنین واکنش هایی منفی است. به عبارت دیگر، آنتالپی فرآورده ها ($H_{\text{پایانی}}$) از آنتالپی واکنش دهنده ها ($H_{\text{آغازی}}$) کم تر است، شکل ۶.



شکل ۶ نمودار تغییر آنتالپی در واکنش سوختن کامل متان

از سوختن یک مول متان 808 کیلو ژول گرما آزاد می شود. چون گرما آزاد شده است، پس علامت ΔH برای این واکنش منفی است؛ $\Delta H_{\text{واکنش}} = -808 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. در یک واکنش گرما ده، گرما آزاد می شود و آنتالپی سیستم کاهش می یابد.

$$H < 0 \quad \Delta H < 0 \quad H_{\text{پایانی}} < H_{\text{آغازی}}$$

آزمایش کنید

هدف: مشاهده‌ی گرمای آزاد شده بر اثر حل شدن کلسیم کلرید بی‌آب در آب
وسایل مورد نیاز: دماسنج، یک بشر 100 mL ، میله‌ی هم‌زن، قاشقک، ترازو،

شیشه‌ی ساعت، گیره و پایه، مقداری نخ

مواد مورد نیاز: کلسیم کلرید بی‌آب، آب مقطر

روش کار

۱- 50 mL آب مقطر در یک بشر 100 mL بریزید.

۲- شیشه‌ی ساعت را روی ترازو قرار دهید و جرم آن را اندازه بگیرید. سپس با کمک قاشقک 10 g کلسیم کلرید بی‌آب توزین کنید.

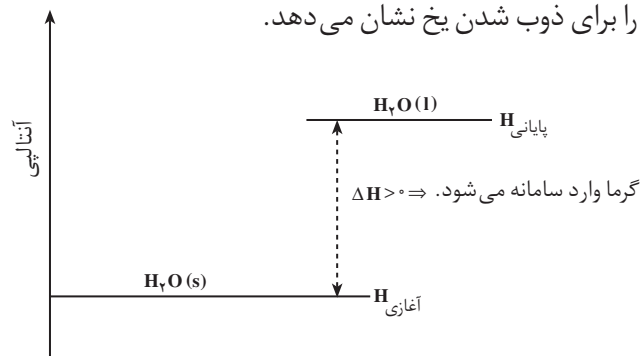
۳- با کمک مقداری نخ دماسنج را به گیره‌ی متصل شده به پایه آویزان کنید و سپس بشر دارای آب را زیر آن قرار دهید. دماسنج طوری در آب قرار گیرد که مخزن آن به طور کامل درون آب مقطر باشد. در ضمن دماسنج نباید هیچ تماسی با بدنه‌ی بشر داشته باشد.
۴- همه‌ی کلسیم کلرید را به کمک قاشقک و به آرامی در آب درون بشر بریزید و سپس با کمک هم‌زن شیشه‌ای آن را به هم بزنید.

۵- مشاهده‌های خود را یادداشت کنید و نتایج آزمایش خود را در کلاس ارائه دهید.

پرسش

به نظر شما چه عواملی می‌توانند در اندازه‌گیری میزان تغییر دمای محلول حاصل خطا ایجاد کنند؟ چه پیشنهادهایی برای رفع آن‌ها دارید؟

می‌دانید که ذوب شدن یخ و تبدیل آن به آب از جمله فرایندهایی است که گرماگیر گفته می‌شود، یعنی برای ذوب کردن یخ به گرما نیاز است. به عبارت دیگر، برای ذوب کردن یخ باید محیط به سامانه گرما بدهد. در چنین فرایندهایی آنتالپی فراورده‌ها ($H_{\text{پایانی}}$) از آنتالپی واکنش‌دهنده‌ها ($H_{\text{آغازی}}$) بزرگ‌تر است و بنابراین علامت ΔH مثبت خواهد بود. شکل ۷ نمودار آنتالپی را برای ذوب شدن یخ نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمودار آنتالپی برای ذوب شدن یخ، مثالی از یک فرایند گرماگیر

برای ذوب کردن یک مول یخ $6/0^\circ$ کیلوژول گرما لازم است. چون این فرایند گرماگیر است پس علامت ΔH باید مثبت باشد؛

$$\Delta H_{\text{ذوب}} = +6 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

در یک فرایند گرماگیر، گرما جذب می شود و آنتالپی سامانه افزایش می یابد.

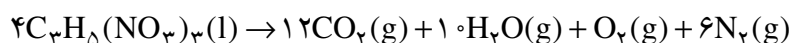
$$H > 0 \quad \Delta H > 0 \quad \text{آغازی} > \text{پایانی} \quad H$$

آزمایش کنید

حل شدن آمونیوم نیترات در آب گرماگیر است. اگر حدود 5 mL آب 20°C را در یک لوله ی آزمایش بریزید و حدود $1/5 \text{ g}$ آمونیوم نیترات خشک را در آن حل کنید، با اندازه گیری دمای آب خواهید دید که دمای آن تقریباً به 0°C کاهش می یابد. «آزمایش کنید» صفحه ی پیش را، این بار با آمونیوم نیترات تکرار کنید. مشاهده های خود را یادداشت کنید و نتایج آزمایش را در کلاس ارائه دهید.

فکر کنید

نیتروگلیسرین از جمله مواد منفجره ی بسیار حساسی است که بر اثر اندکی گرما یا وارد شدن ضربه طی واکنشی گرماده تجزیه می شود. در این واکنش به ازای هر مول نیتروگلیسرین $10^3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1} \times 5/72$ گرما آزاد می شود. تغییر آنتالپی این واکنش چه قدر است و چه علامتی دارد؟ آیا بر اثر انجام شدن این واکنش در فشار ثابت کاری انجام می شود؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

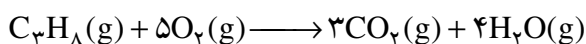


حالت استاندارد

مقدار تغییر آنتالپی (ΔH) برای یک واکنش، مقدار گرمایی است که در تبدیل واکنش دهنده (ها) به فراورده (ها) مبادله می شود.

به عنوان نمونه، در واکنش سوختن پروپان، یک مول گاز پروپان با ۵ مول گاز اکسیژن ترکیب می شود و ۳ مول گاز CO_2 و ۴ مول بخار آب تولید می شود. در این واکنش 2056 kJ گرما هم آزاد می شود. باید توجه داشته باشید که مقدار گرمای آزاد شده در یک واکنش به مقدار واکنش دهنده ها هم بستگی دارد. بنابراین واکنش $5/0^\circ$ مول گاز پروپان با

۲/۵ مول گاز O_۲ مقدار $1028 \text{ kJ} = 2056 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \times 5 \text{ mol}$ / گرم آزاد می کند.



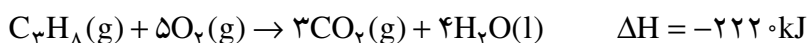
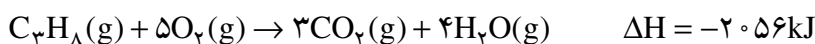
توجه کنید که واکنش دهنده ها و فراورده ها باید در دمای یکسانی باشند و حالت

فیزیکی آن ها به صورت جامد (s)، مایع (l)، گاز (g) و محلول آبی (aq) مشخص باشد.

در صورتی که در واکنش سوختن پروپان، بخار آب تولید شود آنتالپی واکنش

-2056 kJ است. ولی اگر آب به حالت مایع تولید شود، تغییر آنتالپی واکنش برابر با

-222 kJ خواهد بود. (چرا؟)



این نکته نشان می دهد که در هنگام محاسبه ی آنتالپی افزون بر مشخص بودن دما و

فشار باید حالت فیزیکی واکنش دهنده ها و فراورده ها هم مشخص باشد.

برای این که اندازه گیری گرمای همه ی واکنش ها در شرایط یکسانی انجام گیرند،

شرایط ویژه ای به نام «حالت استاندارد ترمودینامیکی» تعریف شده است. حالت استاندارد

ترمودینامیکی، پایدارترین شکل ماده ی خالص در فشار یک اتمسفر و دمایی مشخص

(معمولاً دمای اتاق، 25°C) تعریف می شود. برای نمونه حالت استاندارد نیتروژن،

اکسیژن و کربن در دمای اتاق به ترتیب $\text{N}_2(\text{g})$ ، $\text{O}_2(\text{g})$ و (گرافیت) C (s) است. در واقع

از میان دگرشکل های مختلف یک عنصر پایدارترین آن ها ملاک اندازه گیری قرار می گیرد.

برای مشخص کردن شرایط استاندارد علامت «°» را بالای نماد کمیتی قرار می دهند

که در آن شرایط اندازه گیری می شود. برای مثال ΔH° ، نشان دهنده ی آنتالپی استاندارد

است، یعنی تمام مواد شرکت کننده در واکنش در حالت استاندارد خود و در دمای اتاق (یا هر

دمای مشخص دیگری) در نظر گرفته شده اند.

برای یک ماده در حالت محلول، حالت استاندارد ترمودینامیکی غلظت ۱ مول بر لیتر ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) در نظر گرفته می شود.

برخی از تغییر آنتالپی های مهم

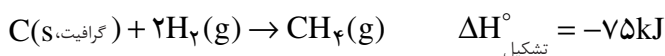
۱- آنتالپی استاندارد تشکیل ($\Delta H_{\text{تشکیل}}^\circ$): به واکنشی که طی آن یک مول ماده از

عنصرهای سازنده اش تشکیل می شود واکنش تشکیل آن ماده می گویند. اگر در این واکنش،

همه ی مواد شرکت کننده در واکنش در حالت استاندارد خود قرار داشته باشد تغییر آنتالپی

این واکنش را آنتالپی استاندارد تشکیل آن ماده ($\Delta H_{\text{تشکیل}}^\circ$) می گویند.

به عنوان نمونه به معادله ی تشکیل متان توجه کنید:



از میان دو دگرشکل مهم کربن یعنی الماس و گرافیت، گرافیت به عنوان حالت استاندارد انتخاب شده است. زیرا گرافیت پایدارتر از الماس است. بنابراین:

$$\Delta H^{\circ}_{\text{تشکیل}} [\text{کربن (s, گرافیت)}] = 0$$

$$\Delta H^{\circ}_{\text{تشکیل}} [(\text{الماس, s, کربن})] = 1/4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

بنابراین، آنتالپی استاندارد تشکیل متان $-75 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ است. آنتالپی استاندارد تشکیل برخی مواد در جدول ۲ آمده است.

مطابق قرارداد آنتالپی استاندارد تشکیل عنصرها صفر در نظر گرفته می شود. به بیان دقیق تر، آنتالپی استاندارد تشکیل ($\Delta H^{\circ}_{\text{تشکیل}}$) پایدارترین دگرشکل یک عنصر در حالت استاندارد، صفر در نظر گرفته شده است.

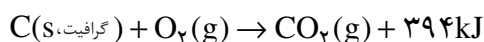
جدول ۲ جدول آنتالپی استاندارد تشکیل برخی مواد در 25°C

| ماده | فرمول شیمیایی ($\Delta H^{\circ}_{\text{تشکیل}} \text{ (kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$) | ماده | فرمول شیمیایی ($\Delta H^{\circ}_{\text{تشکیل}} \text{ (kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$) |
|-----------------|--|-------------------|--|
| اتین | $\text{C}_2\text{H}_2 \text{ (g)}$ | نیتروژن مونواکسید | NO (g) |
| آمونیاک | $\text{NH}_3 \text{ (g)}$ | نیتروژن دی اکسید | $\text{NO}_2 \text{ (g)}$ |
| کربن دی اکسید | $\text{CO}_2 \text{ (g)}$ | اتن | $\text{C}_2\text{H}_4 \text{ (g)}$ |
| کربن مونواکسید | CO (g) | اتان | $\text{C}_2\text{H}_6 \text{ (g)}$ |
| اتانول | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH (l)}$ | متانول | $\text{CH}_3\text{OH (l)}$ |
| متان | $\text{CH}_4 \text{ (g)}$ | سدیم کلرید | NaCl (s) |
| آب | $\text{H}_2\text{O (l)}$ | هیدروژن کلرید | HCl (g) |
| هیدروژن پراکسید | $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ (l)}$ | گوگرد دی اکسید | $\text{SO}_2 \text{ (g)}$ |

فکر کنید

چرا آنتالپی استاندارد تشکیل بسیاری از مواد منفی است؟

۲- آنتالپی استاندارد سوختن ($\Delta H^{\circ}_{\text{سوختن}}$): هنگامی که یک مول از ماده ای در مقدار کافی گاز اکسیژن خالص بسوزد، گرمای واکنش یاد شده آنتالپی استاندارد سوختن آن ماده نامیده می شود. وقتی یک مول کربن یعنی 12 g کربن به طور کامل در اکسیژن بسوزد گاز CO_2 به همراه 394 kJ گرما تولید می شود.



پس می توان نوشت:

$$\Delta H^{\circ}_{\text{سوختن}} [\text{C (s, گرافیت)}] = -394 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

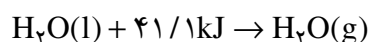
در جدول ۳ آنتالپی استاندارد سوختن برخی ترکیب‌های آلی آمده است.

جدول ۳ آنتالپی استاندارد سوختن برخی ترکیب‌های آلی بر حسب $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

| فرمول مولکولی | $\Delta H^\circ_{\text{سوختن}}$ | فرمول مولکولی | $\Delta H^\circ_{\text{سوختن}}$ |
|----------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| $\text{CH}_4(\text{g})$ | -۸۹۰ | $\text{C}_4\text{H}_{10}(\text{g})$ | -۲۸۷۷ |
| $\text{C}_2\text{H}_6(\text{g})$ | -۱۵۶۰ | $\text{C}_8\text{H}_{18}(\text{g})$ | -۵۵۱۲ |
| $\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$ | -۱۴۰۹ | $\text{CH}_3\text{OH}(\text{l})$ | -۷۱۵ |
| $\text{C}_2\text{H}_2(\text{g})$ | -۱۲۹۹ | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$ | -۱۳۶۸ |
| $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})$ | -۲۲۲۰ | $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}(\text{l})$ | -۲۰۱۰ |

۳- آنتالپی استاندارد تبخیر ($\Delta H^\circ_{\text{تبخیر}}$): هنگامی که یک مول از ماده‌ای در دمای

جوش خود تبخیر شود، تغییر آنتالپی مربوط به این فرایند آنتالپی استاندارد تبخیر آن ماده گفته می‌شود. به عنوان نمونه در شرایط استاندارد برای تبخیر یک مول آب $41/1$ کیلو ژول گرما نیاز است.



پس آنتالپی استاندارد تبخیر یک مول آب $41/1 \text{kJ}$ است، بنابراین:

$$\Delta H^\circ_{\text{تبخیر}} [\text{H}_2\text{O}(\text{l})] = 41/1 \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$$

در جدول ۴ آنتالپی استاندارد تبخیر برای چند ماده آمده است.

جدول ۴ آنتالپی استاندارد تبخیر چند ماده بر حسب $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

| نام ماده | فرمول | $\Delta H^\circ_{\text{تبخیر}}$ |
|-------------|--|---------------------------------|
| آرگون | $\text{Ar}(\text{l})$ | ۶/۵ |
| متان | $\text{CH}_4(\text{l})$ | ۸/۲ |
| دی اتیل اتر | $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}(\text{l})$ | ۲۹/۰ |
| بنزن | $\text{C}_6\text{H}_6(\text{l})$ | ۳۰/۸ |
| اتانول | $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$ | ۳۸/۶ |
| آب | $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ | ۴۱/۱ |
| جیوه | $\text{Hg}(\text{l})$ | ۵۸/۰ |

فکر کنید

با توجه به آنتالپی استاندارد سوختن اتان (C_2H_6)، اتن (C_2H_4) و اتین (C_2H_2)، جدول ۳، انتظار دارید که شعله‌ی حاصل از سوختن کدام یک داغ‌تر باشد؟ چرا؟ پاسخ خود را با نوشتن معادله‌ی موازنه شده‌ی سوختن هر یک از آن‌ها و حالت فیزیکی مواد شرکت‌کننده در واکنش توضیح دهید.