

تعیین منحنی‌های ایزوترم جذب رطوبت و حرارت خالص ایزواستریک جذب آرد گندم

علیرضا رحیمی (کارشناس ارشد)

حسن پهلوان‌زاده (دانشیار)

دانشکده فنی و مهندسی - بخش مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

فصلنامه علمی و پژوهشی شریف
فروغین-پارده‌پشت ۱۳۸۷، شماره چهار و یکم، ص. ۲۲-۲۳

در مطالعه رفتار خشک شدن مواد و طراحی خشک کن‌های صنعتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم منحنی‌های ایزوترم جذب و دفع است. این منحنی‌ها نشان‌دهنده رطوبت بین مقدار رطوبت و رطوبت نسبی تعادلی فضای اطراف ماده (فعالیت آبی) هستند. تعیین ایزوترم‌های جذب و دفع رطوبت یا دو سیستم استاتیکی و دینامیکی ممکن است، چون دست‌یابی به شرایط تعادل در سیستم استاتیکی ممکن است ریزها و حتی هفته‌ها به طول بیانجامد. برای تعیین ایزوترم جذب و دفع رطوبت یک دستگاه آزمایشگاهی با متد دینامیکی طراحی و ساخته شده.

آزمایش‌های جذب رطوبت بر نمونه‌ی آرد گندم در دستگاه مذکور و در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، و فعالیت‌های آبی مختلف انجام شد. به منظور انطباق داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از فرایند جذب مدل‌های جنبی BET، GAB، ازین، اسمیت، ایگلسیاس - شریف، چانگ - فاست، هالسی و هندرسون مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌های GAB، چانگ - فاست و هندرسون با داده‌های آزمایشگاهی به خوبی مطابقت داشتند. مقدار خالص حرارت ایزواستریک جذب با استفاده از ایزوترم مدل هندرسون و رابطه‌ی کلاسیوس - کلایپرن در رطوبت‌های مختلف به دست آمد. این مقدار با افزایش مقدار رطوبت از ۲ تا ۲۰٪ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم جامد خشک) از مقدار ۳۳/۳۴ به ۲۷/۹۸ (کیلو ژول بر مول) کاهش یافت.

alirahsam@yahoo.com
pahlavzh@modares.ac.ir

۱. مقدمه

جذب است که تعیین‌کننده‌ی انرژی پیوندی یا نیروی بین مولکول‌های بخار آب و شبکه‌های قطبی سطوح جاذب است.^[۱] طراحی بهینه در فرایند خشک‌کردن، نگه‌داری و انبارکردن مواد نیازمند یک مدل ریاضی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی است تا از این طریق رفتار جذب و دفع رطوبت مواد قابل پیش‌بینی باشد، و به همین منظور ایزوترم جذب رطوبت بهترین وسیله برای پاسخ‌گویی به این نیازها است.^[۲] مدل‌های ریاضی متعددی به منظور توصیف رفتار جذب رطوبت مواد غذایی در تحقیقات آمده است. تعدادی از این مدل‌ها مبتنی بر نظریه‌ی سازوکار جذب‌اند و تعدادی دیگر جنبه‌ی کاملاً تجربی و برخی جنبه‌ی نیمه‌تجربی دارند.^[۳]

به دلیل پیچیدگی ترکیبات و ساختمان مواد غذایی پیش‌بینی ریاضی رفتار جذب عموماً دشوار است. بنابراین زمانی که تغییرات برگشت‌ناپذیری در دماهای بالا اتفاق می‌افتد اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در این دماها ضروری به نظر می‌رسد. داشتن یک مدل ریاضی واحد، تجربی و یا نظری، که بتواند دقیقاً ایزوترم جذب را در کل محدوده‌ی فعالیت آبی و برای مواد مختلف ارائه کند، غیر ممکن به نظر می‌رسد. تحقیقات بیشتر در این زمینه نشان می‌دهد که ایزوترم‌های جذب رطوبت مواد غذایی را می‌توان با بیش از یک مدل جذب توصیف کرد.^[۴]

یکی از روش‌های مهم تعیین انرژی پیوندی بین آب و ماده‌ی جامد، محاسبه‌ی حرارت خالص ایزواستریک جذب حاصل از ایزوترم‌های جذب و دفع رطوبت در

انتقال آب پدیده‌ی مهمی است که در فرایند مواد، به ویژه مواد غذایی، اتفاق می‌افتد. این جابه‌جایی ممکن است بین دو ماده، یا بین یک ماده و محیط اطراف آن برقرار شود که مورد دوم در فرایند جذب و دفع بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. خواص ترمودینامیکی مواد غذایی که عموماً غلظت آب موجود در مواد را به فشار جزئی آن مرتبط می‌سازد، در تحلیل پدیده‌های انتقال حرارت و جرم که در فرایند خشک کردن اتفاق می‌افتد، نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این خواص، اطلاعاتی از نقطه‌ی پایانی خشک‌شدن مواد غذایی برای رسیدن به حالت پایدار از مقدار رطوبت بهینه و کم‌ترین مقدار نظریه‌ی انرژی، برای حذف مقدار معینی از آب ماده غذایی را در اختیار قرار می‌دهند.^[۵] در حین انجام فرایند جذب و دفع، مقدار رطوبت موجود در ماده و فعالیت آبی یا رطوبت نسبی در حال تعادل با ماده، از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند. با انجام آزمایش در دمای ثابت، می‌توان به نحوه‌ی تغییرات این مقادیر در فرایند جذب و دفع پی برد. در بسیاری از موارد داده‌های جذبی و منحنی جذب تنها در یک دما مورد نیاز است، اما برای تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و مدل کردن فرایندهای خشک کردن و قابلیت انبارداری، به دست آوردن داده‌ها در محدوده‌ی از دما ضروری به نظر می‌رسد. مهم‌ترین پارامتر ترمودینامیکی مورد بررسی، مقدار حرارت ایزواستریک

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان دستگاه را شامل دو قسمت اصلی دانست: قسمت اول محفظه‌ی اصلی دستگاه با دما و رطوبت کنترل شده، و قسمت دوم ترازوی الکترونیکی برای ثبت پیوسته‌ی وزن نمونه.

در محفظه‌ی اصلی دستگاه علاوه بر نگهداری نمونه‌ی مورد آزمایش؛ عمل کنترل، همگن‌سازی و اندازه‌گیری دما و رطوبت انجام می‌گیرد. طی انجام آزمایش جذب و حصول شرایط تعادل نمونه برای توزین از دستگاه خارج نمی‌شود و وزن آن نیز از طریق ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۰۱ که از پایین محفظه به آن متصل شده و کفه‌ی آن در داخل محفظه قرار می‌گیرد، دائماً ثبت می‌شود. مقدار رطوبت مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت‌های نسبی مختلف در محفظه‌ی دستگاه توسط یک دستگاه رطوبت‌ساز تأمین می‌شود. با قراردادن پیچ تنظیم دبی بخار در موقعیت‌های مختلف می‌توان به دبی‌های مختلفی از بخار سرد تولید شده دست یافت. دبی هوای ورودی به محفظه نیز از طریق یک شیر کنترل‌کننده‌ی دبی قابل تنظیم است و از اختلاط نسبت‌های مختلفی از هوا و بخار ورودی می‌توان به رطوبت‌های نسبی مختلف در داخل محفظه دست یافت. پمپ خلأ به منظور خروج هوای مرطوب از محفظه به‌کار برده می‌شود. با قرار دادن قسمت ابتدایی لوله‌ی مکش هوا در مجاورت نمونه، جریان هوای مورد نیاز از روی نمونه برای رسیدن به شرایط سیستم دینامیکی فراهم می‌شود. از مجموعه‌ی حساسه‌ی، کنترل‌کننده‌ی دما و گرم‌کن برای کنترل دمای محفظه با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. وجود یک فن کوچک در داخل محفظه علاوه بر این که سبب اختلاط کامل هوا و بخار ورودی می‌شود، با به گردش درآوردن هوای داخل محفظه دمای یکنواختی در سراسر آن ایجاد می‌کند.

دماهای مختلف است. [۶] این مقدار در یک نقطه‌ی معین از مقدار رطوبت به‌وسیله‌ی منحنی‌های ایزوترم جذب و دفع، و با استفاده از رابطه‌ی کلاسیوس - کلایرون به دست می‌آید. این مقدار برای تخمین اثری مورد نیاز خشک‌کردن به‌کار می‌رود و اطلاعات ارزشمندی از رطوبت مواد را در دسترس قرار می‌دهد. [۷]

در این نوشتار سعی بر آن است که علاوه بر به‌دست آوردن منحنی‌های ایزوترم جذب آرد گندم در سه دما به‌کمک مناسب‌ترین مدل‌ها، برای اولین بار بهترین معادلات عمومی ایزوترم که شامل پارامتر دما نیز هست و همچنین مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب این ماده به دست آید.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد

آرد گندم ماده‌ی سرشار از پروتئین و نشاسته است که کاربرد فراوانی دارد. عمده‌ی مصرف آرد گندم در صنایع تهیه‌ی ماکارونی، بیسکویت، نشاسته، آرد و نان سوخاری و نان‌های حجیم و نیمه‌حجیم است.

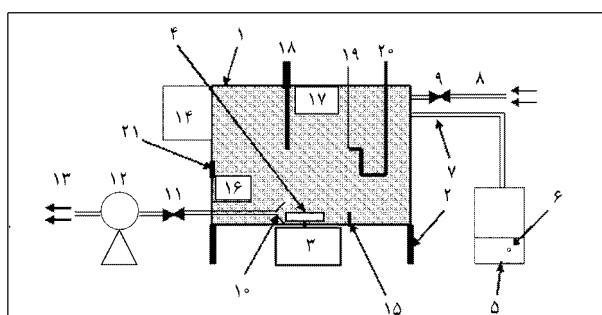
نمونه‌های آرد خشک مورد استفاده در تحقیق به‌منظور انجام آزمایش‌های جذب، به‌وسیله خشک‌کردن آرد مورد نیاز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت شش ساعت در فور آزمایشگاهی به‌دست می‌آید و در بسته‌بندی کاملاً عایق شده و در دسیکاتور حاوی سیلیکاژن نگهداری می‌شود. خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه بکاررفته در آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. خشک‌کن آزمایشگاهی تعیین‌کننده‌ی ایزوترم جذب و دفع

رطوبت

روش‌های معمول برای به‌دست آوردن ایزوترم‌های جذب عبارت‌اند از: روش‌های گراویمتریک، مانومتریک و هاگرومتریک. روش مانومتریک فشار بخار یکی از بهترین روش‌ها است که مستقیماً فشار بخار رطوبت موجود در مواد را اندازه‌گیری می‌کند. روش گراویمتریک یک روش استاندارد است که بیشتر برای به‌دست آوردن ایزوترم جذب و انجام آزمایش‌های جذبی توصیه می‌شود. با استفاده از این روش در آزمایشگاه می‌توان به‌طور پیوسته یا متناوب تغییرات رطوبت نمونه‌ها را به‌کمک دو سیستم اصلی به‌دست آورد [۳]: سیستم استاتیکی مانند یک ظرف بسته به‌همراه محلول‌های نمکی اشباع یا اسیدسولفوریک در دمای کنترل شده که رطوبت‌های نسبی متفاوتی ایجاد می‌کند و سیستم دینامیکی به‌صورت هوای چرخشی با شدت جریان ثابت اطراف نمونه، که در این روش می‌توان وزن نمونه را به‌طور پیوسته یا ناپیوسته به‌دست آورد. سیستم دینامیکی با ثبت پیوسته‌ی تغییرات رطوبت پیچیده‌تر و کنترل آن مشکل‌تر از سیستم استاتیکی است. در این سیستم جریان هوای اطراف نمونه به فرایند رطوبت دهی یا رطوبت زدایی سرعت می‌بخشد.

دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی برای تعیین ایزوترم جذب و دفع رطوبت به‌صورت دینامیکی طراحی و ساخته شد. جریان هوا با رطوبت‌های مختلف بر روی نمونه واقع در دستگاه دست‌یابی به داده‌های رطوبت تعادلی را با سرعت قابل قبولی ممکن می‌سازد. این دستگاه به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



۱. محفظه‌ی اصلی دستگاه، ۲. نگه‌دارنده‌ی محفظه، ۳. ترازوی الکترونیکی، ۴. کفه‌ی ترازو، ۵. رطوبت‌ساز، ۶. پیچ مخصوص تنظیم دبی بخار، ۷. لوله‌ی مخصوص ورود بخار، ۸. لوله‌ی مخصوص ورود هوا، ۹. شیر کنترل دبی هوای ورودی، ۱۰. قسمت قیفی شکل‌کننده‌ی هوای مرطوب، ۱۱. شیر کنترل دبی هوای خروجی، ۱۲. پمپ خلأ، ۱۳. خروج هوای مرطوب، ۱۴. کنترل‌کننده‌ی دما، ۱۵. حساسه‌ی دما، ۱۶. گرم‌کن، ۱۷. فن، ۱۸. رطوبت‌سنج دیجیتال، ۱۹. دماسنج جیوه‌ی، ۲۰. لوله‌ی مرطوب‌کننده‌ی مخزن جیوه‌ی دماسنج به‌صورت TU، ۲۱. دستگیره‌ی مخصوص باز و بسته‌کردن درب محفظه.

شکل ۱. دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی تعیین ایزوترم جذب و دفع رطوبت به‌صورت دینامیکی.

جدول ۱. خواص فیزیکی و شیمیایی حاصل از آزمایش آرد نول پایه.

درصد رطوبت (kg/kg w.b)	درصد خاکستر (kg/kg d.b)	درصد گلوتمن تر (kg/kg w.b)	pH	درصد دانه‌بندی (میکرون)					
				۴۶۳	۲۵۰	۱۸۰	۱۱۲	۹۰	< ۹۰
۱۴/۱۰	۰/۵۱۱	۲۳/۴۰	۵/۹۶	۰	۹/۷۳	۳۸/۴۱	۱۰/۷۶	۲۴/۵۷	۱۶/۳۲

۳.۲. نحوه‌ی به‌دست آوردن داده‌های آزمایشگاهی در سیستم

دینامیکی

به‌منظور دست‌یابی به داده‌های آزمایشگاهی در یک دما، کنترل‌کننده‌ی دما را روی آن دما تنظیم می‌کنند تا محفظه به دمای مورد نظر برسد. حال اولین رطوبت نسبی مورد نیاز را انتخاب کرده و با تنظیم دبی‌های ورودی هوا و بخار آب، رطوبت نسبی محفظه روی آن مقدار ثابت می‌شود. این دما و رطوبت نسبی، شرایط عملیاتی برای کسب اولین داده آزمایشگاهی است. وزن مشخصی از ماده‌ی خشک مورد نظر (حدود ۵ گرم) را در داخل دستگاه قرار داده و تغییرات وزن نمونه را تا رسیدن به نقطه‌ی تعادل ثبت می‌کنند. تعادل زمانی حاصل می‌شود که بین وزن نمونه در دو زمان توزین متوالی هیچ اختلافی مشاهده نشود. برای افزایش دقت انجام کار هر آزمایش ۲ الی ۳ مرتبه تکرار می‌شود. در صورت یکسان بودن نتایج حاصل به‌عنوان داده‌ی صحیح پذیرفته می‌شود.

۴.۲. مدل‌های جذب

طی سالیان گذشته مدل‌های ریاضی متعددی به‌منظور تشریح خواص جذب و دفع مواد مختلف ارائه شده است. این مدل‌ها را می‌توان به‌مدل‌های سینتیکی بر مبنای رطوبت تک‌لایه، مدل‌های سینتیکی بر مبنای رطوبت چندلایه و میعان فیلمی، مدل‌های تجربی، مدل‌های نیمه تجربی و مدل‌های دربرگیرنده‌ی تأثیر دما دسته‌بندی کرد. [۸] تعدادی از این مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مدل BET پیشگوی ایزوترم‌های جذب رطوبت بر مبنای معادله‌ی لانگمیر است. [۹] مدل GAB شکل گسترده‌ی معادله‌ی BET، با در نظر گرفتن خواص اصلاح شده‌ی آب جذب شده در یک ناحیه‌ی چندلایه‌ی است. این مدل برای برآزش داده‌های ایزوترم جذب بیشتر محصولات غذایی مناسب گزارش شده است. [۱۰] مدل ازوین (۱۹۴۶) بسط سری منحنی‌های ایزوترم جذب سیگموئیدی (S شکل) است. این مدل برای توصیف ایزوترم‌های مواد غذایی حاوی پروتئین و نشاسته و نیز گوشت و سبزیجات مناسب است. [۱۱] مدل اسمیت (۱۹۴۷) برای اکثر مواد، در دامنه‌ی فعالیت آبی ۰/۳ تا ۰/۵ خوب عمل می‌کند. این مدل برای برآزش داده‌های جذب در فعالیت‌های بالای ۰/۵ نیز کاربرد دارد. [۱۲] محققان برای توصیف رفتار جذبی انواع

جدول ۲. مدل‌های ریاضی جذب به‌منظور انطباق با داده‌های آزمایشگاهی.

مدل	معادله‌ی ایزوترم	مقادیر ثابت	نوع مدل
BET	$X = \frac{X_m c a_w}{(1-a_w)(1-a_w+ca_w)}$	X_m, c	مدل سینتیکی بر مبنای رطوبت تک‌لایه
GAB	$X = \frac{X_m c k a_w}{(1-ka_w)(1-ka_w+ck a_w)}$	X_m, c, k	مدل سینتیکی بر مبنای رطوبت چندلایه
ازوین	$X = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^B$	A و B	مدل تجربی
اسمیت	$X = A - B \ln(1-a_w)$	A و B	مدل تجربی
ایگلسیاس	$X = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right) + B$	A و B	مدل نیمه‌تجربی
چانگ و فاست	$X = -\frac{1}{B} \ln \left(-\frac{\ln a_w}{A} \right)$	A و B	مدل تجربی
هالسی	$X = \left[-\frac{A}{\ln(a_w)} \right]^B$	A و B	مدل نیمه‌تجربی
هندرسون	$X = \left[-\frac{1}{A} \ln(1-a_w) \right]^B$	A و B	مدل نیمه‌تجربی

میوه‌ها و محصولات غذایی غنی از قند پس از تحقیق بر روی یک مدل تجربی، مدل مورد نظر را ارائه کردند. [۱۳] مدل چانگ و فاست (۱۹۶۷) برای پیش‌بینی ایزوترم اکثر مواد غذایی در کلیه‌ی محدوده‌ها یک مدل مناسب است. [۱۴] مدل هالسی (۱۹۴۸) برای توصیف میعان چندلایه‌ی در فاصله‌ی نسبتاً طولانی از سطح بکار می‌رود. [۱۳] مدل هندرسون مدلی گسترده و مناسب برای توصیف رفتار جذبی مواد غنی از نشاسته و پروتئین‌های کروی در محدوده‌ی وسیعی از فعالیت آبی است. انطباق خوب این مدل بیانگر پایداری مواد نشاسته‌ی و ساختار متخلخل ریز برای جذب هرچه بهتر رطوبت است. [۱۵]

پارامترهای مدل‌های جذب به‌کمک آنالیز رگرسیون غیرخطی، و از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست می‌آیند. با مشخص شدن این مقادیر ثابت، مدل‌های ایزوترم کاملاً مشخص می‌شوند. به‌این منظور از برنامه‌های Microsoft Excel ۲۰۰۳ و Datafit استفاده می‌کنند. از بین مدل‌های موجود، مدل‌های BET و GAB با داشتن پارامتر X_m ، مقدار رطوبت تک‌لایه‌ی مواد را مشخص می‌کنند. این مقدار بیانگر ظرفیت جذبی جاذب و میزان آمادگی شبکه‌های قطبی به‌منظور ایجاد پیوند با بخار آب است. [۱۶] تعیین مقدار X_m از این نظر اهمیت دارد که میزان فساد و افت کیفیت مواد غذایی، در مقادیر پایین آن بسیار ناچیز است. زیرا آب در این شرایط با شبکه‌ی مواد غذایی پیوندی قوی دارد و نمی‌تواند به‌صورت حلال یا سوپراتر، در واکنش‌های ناخواسته‌ی که سبب بروز فساد می‌شوند، شرکت کند. [۱۶] مقدار X_m با افزایش دما کاهش می‌یابد، زیرا مولکول‌های آب که به‌صورت بخار در فضای اطراف پراکنده‌اند، با افزایش دما انرژی جنبشی بیشتری می‌یابند. [۱۷] همچنین ممکن است به‌دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از افزایش دما، تعدادی از مراکز فعال قطبی مواد برای ایجاد پیوند با آب کاهش یابند. [۱۸]

مدل‌های منطبق شده به‌وسیله‌ی مقدار P یا درصد انحراف نسبی میانگین ارزیابی می‌شوند. [۱۹]

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{ei} - X_{ci}|}{X_{ei}} \quad (1)$$

X_{ei} مقادیر رطوبت به‌دست آمده‌ی آزمایشگاهی، X_{ci} مقادیر رطوبت محاسبه شده از مدل‌ها، و N تعداد داده‌های آزمایشگاهی است.

مدل‌های دارای مقدار P پایین، مدل‌های مناسبی برای توصیف ایزوترم در آن دما محسوب می‌شوند. بهترین مدل نیز مدلی است که ضمن سادگی، درصد میانگین نسبی انحراف آن نسبت به مدل‌های دیگر کم‌تر باشد و با داده‌های آزمایشگاهی به‌خوبی مطابقت داشته باشد.

۵.۲. محاسبه‌ی مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب

نیروی جاذبه‌ی مولکولی بین شبکه‌ی جاذب و بخار آب حرارت ایزواستریک جذب نامیده شده که انرژی پیوندی و انرژی مورد نیاز خشک‌شدن را در دسترس قرار می‌دهد. مناسب‌ترین راه برای کسب مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب، استفاده از ایزوترم‌های جذب و دفع رطوبت است. با استفاده از رابطه‌ی کلاسیوس-کلایرون و محاسبه‌ی شیب می‌توان به‌مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب دست یافت. [۲۰]

$$\frac{\partial \ln a_w}{\partial (1/T)} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (2)$$

و

$$q_{st} = Q_{st} - \Delta H_{vap} \quad (3)$$

a_w فعالیت آبی، q_{st} مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب برحسب کیلوژول بر مول (گرمای تشکیل یا شکستن پیوند)، Q_{st} کل حرارت جذب، ΔH_{vap} حرارت تبخیر برحسب کیلوژول بر مول آب، R ثابت عمومی گازها و T دمای مطلق است. [۱۹]

۳. نتایج

۳.۱. به‌دست آوردن داده‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌های جذب و دفع رطوبت بر روی آرد گندم و در سه دمای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در فرایند خشک کردن با توجه به مقادیر رطوبت‌های اولیه‌ی آرد مورد استفاده (حدود ۰/۱۲ کیلوگرم آب بر کیلوگرم جامد خشک) و منحنی‌های خشک شدن حاصله، ملاحظه می‌شود که مرحله‌ی شدت ثابت خشک شدن که در آن شیب منحنی خشک‌شدن به‌صورت خطی است و آب‌های آزاد از ماده دفع می‌شوند، یا اصلاً در منحنی وجود ندارد و یا در صورت وجود در مقطع خیلی کوتاهی از زمان حادث می‌شود. بنابراین با دقت خیلی خوب می‌توان فرض کرد عمل خشک شدن آرد گندم با رطوبت اولیه‌ی ذکر شده، در مرحله‌ی شدت نزولی خشک شدن انجام می‌گیرد.

در فرایند جذب کم‌ترین زمان دست‌یابی به تعادل به انجام آزمایش در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۰/۹۱ به مدت ۱/۵ ساعت، و بیشترین زمان دست‌یابی به تعادل به انجام آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۰/۲۷۶ به مدت ۵ ساعت مربوط می‌شود. داده‌های تعادلی حاصل از انجام آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳.۲. انطباق مدل‌های جذب با داده‌های آزمایشگاهی

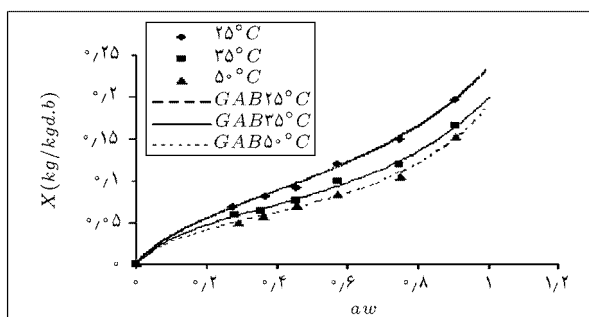
برای اطمینان از ایزوترم‌های رطوبت تعادلی به دست آمده از آزمایش‌ها، باید آنها را با کار دیگران مقایسه کرد ولی متأسفانه کار مشابه در مراجع که بتوان این نتایج را با آنها مقایسه کرد، به‌دست نیامده است و تنها به تحقیق چندتن از همکاران که در آن چند نقطه از یک ایزوترم آرد گندم در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد ذکر شده و با نتایج این تحقیق همخوانی قابل قبولی دارد، می‌توان اشاره کرد. [۲۰]

برای انطباق داده‌های آزمایشگاهی از هشت مدل جذبی مختلف (شامل مدل‌های GAB، BET، ازوین، اسمیت، ایگلسیاس - شریف، چانگ - فاست، هالسی و هندرسون) استفاده شد. از بین مدل‌های نامبرده، مدل‌های BET و GAB برای تعیین مقدار رطوبت تک‌لایه مورد استفاده قرار می‌گیرند. انطباق مدل BET با استفاده از داده‌های فعالیت آبی واقع در محدوده‌ی ۰/۰۶-۰/۱۱ صورت می‌گیرد و این مدل در فعالیت‌های آبی بالا انطباق خوبی از خود نشان نمی‌دهد. پارامترهای

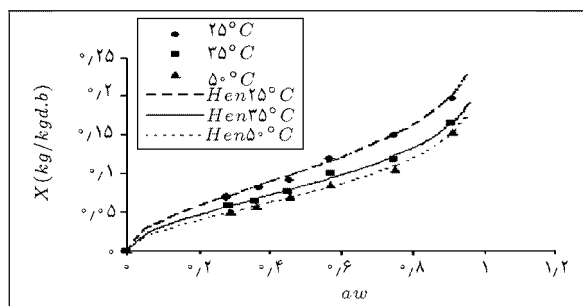
حاصل از انطباق مدل‌های جذب با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است.

برای مشخص کردن مدل‌های مناسب برای تعیین منحنی‌های ایزوترم رطوبت آرد گندم، باید درصد میانگین نسبی انحراف یا مقدار P آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. مقادیر P محاسبه شده به‌کمک معادله‌ی ۱ برای مدل‌های مورد بررسی در جدول ۳ آمده است.

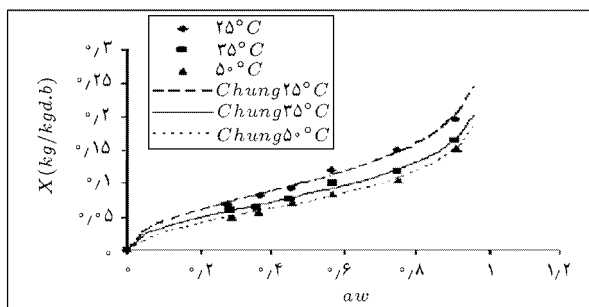
با توجه به نتایج موجود در جدول ۴، واضح است که مدل‌های BET، GAB، چانگ - فاست و هندرسون از مقدار P و میزان پراکندگی کم‌تری نسبت به مدل‌های دیگر برخوردارند و می‌توان از این مدل‌ها برای تعیین ایزوترم در هر سه دما استفاده کرد. کم‌ترین درصد پراکندگی مربوط به مدل هندرسون (۳۶۰۹-۲۶۰۳) است که بهترین تشریح از رفتار جذبی مواد نشاسته‌یی را شامل می‌شود. خطای مربوط به مدل‌های ازوین و اسمیت نیز در حد قابل قبولی است، اما مدل‌های ایگلسیاس و هالسی در انطباق با داده‌های آزمایشگاهی خطاهای زیادی دارند. از مدل‌های GAB، هندرسون و چانگ - فاست با توجه به خطای ناچیزی که نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دارند، می‌توان به‌عنوان بهترین مدل‌های انتخاب شده برای ترسیم ایزوترم



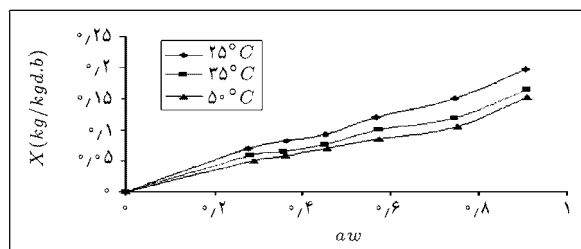
شکل ۳. منحنی‌های ایزوترم حاصل از انطباق مدل GAB با داده‌های آزمایشگاهی.



شکل ۴. منحنی‌های ایزوترم حاصل از انطباق مدل هندرسون با داده‌های آزمایشگاهی.



شکل ۵. منحنی‌های ایزوترم حاصل از انطباق مدل چانگ - فاست با داده‌های آزمایشگاهی.



شکل ۶. داده‌های تعادلی به‌دست آمده از انجام آزمایش در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد.

جدول ۳. مقادیر ثابت حاصل از انطباق مدل‌های مختلف با داده‌های آزمایشگاهی.

مدل	معادله ایزوترم	مقادیر ثابت		
		دمای عملیاتی (°C)		
BET	$X = \frac{X_0 c a_w}{(1-a_w)(1-a_w+c a_w)}$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۰۵۲۱	۰٫۰۴۳۲	۰٫۰۳۷۴
		۹۸٫۲۵۶۶	۷۳٫۱۹۹۹	۵۷٫۹۵۵۸
GAB	$X = \frac{X_0 c k a_w}{(1-k a_w)(1-k a_w+c k a_w)}$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۰۹۰۴	۰٫۰۶۵۸	۰٫۰۵۳۴
		۷٫۶۷۹۷	۱۰٫۲۷۰۷	۱۱٫۲۷۲۲
ازین	$X = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^B$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۱۰۱۹	۰٫۰۸۳۳	۰٫۰۷۲۴
		۰٫۳۰۰۶	۰٫۳۰۵۲	۰٫۳۲۶۲
اسمیت	$X = A - B \ln(1 - a_w)$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۵۷۴	۰٫۴۶۵	۰٫۳۷۸
		۰٫۰۶۱۵	۰٫۰۵۱۱	۰٫۰۴۸۳
ایگلسیاس	$X = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right) + B$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۱۲۳	۰٫۱۰۱	۰٫۰۹۰۶
		۰٫۰۸۶۲	۰٫۰۷۰۴	۰٫۰۶۰۴
چانگ و فاست	$X = -\frac{1}{B} \ln \left(-\frac{\ln a_w}{A} \right)$	۲۵	۳۵	۵۰
		۵٫۳۹۹۰	۵٫۲۵۰۳	۴٫۴۷۳۵
		۱۹٫۹۹۰۴	۲۴٫۰۵۹۲	۲۵٫۴۲۸۳
هالسی	$X = \left[-\frac{A}{\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{B}}$	۲۵	۳۵	۵۰
		۰٫۰۰۱۱	۰٫۰۰۰۷	۰٫۰۰۰۰۸
		۲٫۷۸۶۴	۲٫۷۴۵۵	۲٫۵۷۴۶
هندرسون	$X = \left[-\frac{1}{A} \ln(1 - a_w) \right]^{\frac{1}{B}}$	۲۵	۳۵	۵۰
		۵٫۱۹۰۸۱	۷٫۰۶۵۵۳	۶٫۵۸۵۲۱
		۱٫۹۰۶۵	۱٫۸۷۶۳	۱٫۷۴۷۱

جدول ۴. درصد میانگین نسبی انحراف یا مقادیر P مدل‌های ارزیابی شده.

T (°C)	مقدار P (%)					
	BET	GAB	ازین	اسمیت	ایگلسیاس	چانگ هالسی
۲۵	۱٫۱۸	۱٫۹۷	۵٫۹۱	۵٫۸۶	۱۴٫۳۷	۳٫۳۳
۳۵	۱٫۲۲	۳٫۰۸	۴٫۸۷	۴٫۸۵	۱۳٫۵۷	۲٫۷۲
۵۰	۲٫۱۹	۲٫۹۴	۴٫۴۳	۴٫۵۸	۱۳٫۴۴	۲٫۳۴

نمونه‌ی خشک آرد گندم در یک نقطه از دماهای ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده با مقادیر محاسبه شده با مقایسه‌ی معادلات ایزوترم عمومی در این دو دما، خطای موجود بین آنها محاسبه شد (جدول ۷). با توجه به مقادیر حاصل از مدل‌های عمومی و مقادیر آزمایشگاهی، و مقدار خطای موجود بین آنها (کمتر از ۶ درصد) واضح است که با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان از مدل‌های عمومی به‌صورت یاد شده در جدول ۶ به‌منظور توصیف منحنی‌های ایزوترم آرد گندم در کلیه‌ی دماها بهره گرفت.

مقادیر ثابت مدل‌های BET و GAB در جدول ۳ ارائه شده است. چنان‌که اشاره شد این دو مدل برای دستیابی به مقادیر رطوبت تک‌لایه (X_0) و مقادیر ثابت انرژی (c) کاربرد دارند. مقادیر رطوبت تک‌لایه‌ی به‌دست آمده از مدل BET در سه دمای عملیاتی از مقادیر به‌دست آمده از مدل GAB همواره کوچک‌تر است. مقادیر X_0 به دست آمده در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب برای مدل BET، ۰٫۰۵۲۱، ۰٫۰۴۳۲ و ۰٫۰۳۷۴ و برای مدل GAB، ۰٫۰۹۰۴، ۰٫۰۶۵۸ و ۰٫۰۵۳۴ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم جسم جامد) است. مطابق انتظار مقادیر رطوبت تک‌لایه نیز با افزایش دما کاهش می‌یابند. مقادیر c در مدل BET از مدل GAB بزرگ‌ترند. چون ثابت c در مدل BET مربوط به انرژی جذب تک‌لایه،

جدول ۵. مقادیر ثابت حاصل از انطباق مدل‌های MHEE و MCPE با داده‌های آزمایشگاهی سه‌دما.

نام مدل	معادله	مقادیر ثابت
هندرسون اصلاح‌شده (MHEE)	$X = \left[-\frac{\ln(1-a_w)}{a_1(T+a_2)} \right]^{1/a_3}$	a_1 ۱٫۶۱۲۶
		a_2 ۵٫۰۳۰۸
		a_3 ۱٫۸۶۱۰
چانگ - فاست اصلاح‌شده (MCPE)	$X = -\frac{1}{b_1} \ln \left[-\frac{T+b_2}{b_1} \ln a_w \right]$	b_1 ۱۶٫۴۱۸۹
		b_2 -۳٫۳۵۸۴
		b_3 ۲۲٫۹۸۲۲

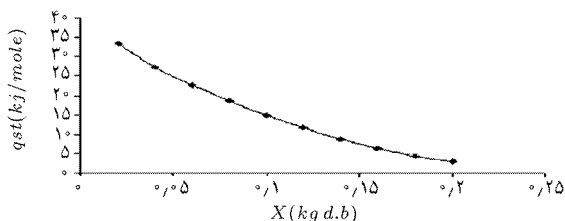
جذب رطوبت آرد گندم استفاده کرد. این نتایج در شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است. مطابق انتظار، منحنی ایزوترم جذب رطوبت آرد گندم در این سه دما به‌صورت S، یا از نوع II هستند. شکل ظاهری این ایزوترم‌ها نشان می‌دهد که فرایند جذب در آرد گندم و دیگر مواد سرشار از نشاسته و پروتئین به‌صورت چندلایه اتفاق می‌افتد. همانگونه که از منحنی‌های ایزوترم شکل‌های ۳ تا ۵ مشخص است، مقدار رطوبت تعادلی مواد در فعالیت آبی مشخص، با افزایش دما کاهش می‌یابد و نیز در مقدار رطوبت تعادلی معین، با افزایش دما فعالیت آبی نیز افزایش می‌یابد. به‌علاوه جذب رطوبت آرد گندم با افزایش فعالیت آبی در دمای ثابت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه مدل‌های هندرسون و چانگ - فاست در هر سه دمای عملیاتی، و در انطباق با داده‌های آزمایشگاهی کم‌ترین مقدار خطا را دارند، با قابل قبول دانستن مقدار معینی خطا می‌توان از مدل‌های اصلاح شده هندرسون (MHEE) و اصلاح شده چانگ - فاست (MCPE) جهت انطباق استفاده کرد. در مدل‌های نامبرده به‌تأثیر دما بر روی ایزوترم توجه شده است. در اثر انطباق این مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی دماهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان به مدل عمومی ایزوترم آرد گندم به‌صورت معادله‌ی شامل ترم دما دست یافت. نتایج حاصل از انطباق مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۵، و مدل‌های اصلاح شده‌ی هندرسون و چانگ - فاست برای آرد گندم بر حسب دما در جدول ۶ ارائه شده‌اند. برای مشخص شدن میزان کارایی ایزوترم‌های عمومی، آزمایش جذب بر روی

جدول ۶. شکل عمومی مدل‌های اصلاح شده هندرسون و چانگ - فاست برای آرد گندم در کلیه دماها.

نام مدل	فرم کلی ایزوترم (دما بر حسب درجه سانتیگراد)
هندرسون اصلاح شده (MHEE)	$X = \left[-\frac{\ln(1-a_w)}{\sqrt{6126(T+5)^{3.8}}} \right]^{0.5333}$
چانگ - فاست اصلاح شده (MCPE)	$X = -0.0435 \ln [-0.0062(T - 3,3584) \ln a_w]$

جدول ۷. نتایج حاصل از مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر حاصل از مدل‌های عمومی.

T (°C)	a _w	X _{exp} (kg/kg d.b)	نام مدل			
			MHEE		MCPE	
			X _{cal} (kg/kg d.b)	P (%)	X _{cal} (kg/kg d.b)	P (%)
۳۰	۰٫۶۶۴	۰٫۱۲۲۸	۰٫۱۱۹۹	۲٫۳۶	۰٫۱۱۷۲	۴٫۵۶
۴۰	۰٫۴۸۷	۰٫۰۸۳۳	۰٫۰۸۰۶	۳٫۲۴	۰٫۰۷۸۸	۵٫۴۰



شکل ۶. منحنی تغییرات مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب آرد گندم بر حسب مقدار رطوبت.

۴. نتیجه‌گیری

۱. با انجام آزمایش جذب و دفع به کمک سیستم دینامیکی، دست‌یابی به داده‌های تعادلی در زمانی کم‌تر از ۵ ساعت ممکن است.
۲. منحنی‌های ایزوترم جذب رطوبت آرد گندم در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد که از طریق آزمایش به دست آمدند، با مدل‌های موجود مقایسه شدند که در بین آنها مدل‌های GAB، هندرسون و چانگ - فاست بهترین انطباق را نشان دادند.
۳. مدل‌های اصلاح شده‌ی هندرسون و چانگ - فاست به‌عنوان مدل ایزوترم‌های جذب آرد گندم بر حسب دما با دقت خوبی ارائه شدند.
۴. مقدار رطوبت تعادلی آرد گندم در فعالیت آبی مشخص، بر اثر افزایش دما کاهش می‌یابد و همچنین در مقدار رطوبت تعادلی معین، بر اثر افزایش دما فعالیت آبی افزایش می‌یابد.
۵. مقادیر رطوبت تک‌لایه‌ی محاسبه شده‌ی آرد گندم در یک دما، برای مدل GAB از مدل BET بزرگترند. این مقادیر نیز بر اثر افزایش دما کاهش می‌یابند.
۶. مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب با افزایش مقدار رطوبت کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر انرژی پیوندی آب با مواد در رطوبت‌های پایین قوی‌تر است. در محدوده‌ی ۰٫۲ تا ۰٫۲۵ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم جامد خشک) از مقدار رطوبت بررسی شده، مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب به ترتیب از ۳۳٫۳۴ تا ۲٫۹۸۸ (کیلوژول بر مول) متغیر است.

فهرست علائم

- A و B: پارامترهای مدل جذب؛
 a_w: فعالیت آبی؛
 C: پارامتر انرژی در مدل‌های BET و GAB؛
 k: پارامتر تصحیح مدل GAB؛
 P: درصد انحراف نسبی میانگین؛
 q_{st}: حرارت خالص ایزواستریک جذب؛
 Q_{st}: حرارت کل جذب؛
 R: ثابت جهانی گازها؛
 X: مقدار رطوبت؛
 X₀: مقدار رطوبت تک‌لایه؛
 X_{ci}: مقادیر رطوبت محاسبه شده؛
 X_{ci}: مقادیر رطوبت آزمایشگاهی؛
 ΔH_{vap}: حرارت تبخیر آب.

۳.۳. حرارت جذب

مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب در ۱۰ نقطه‌ی معین از مقدار رطوبت منحنی‌های ایزوترم جذب و دفع مدل هندرسون و به کمک رابطه‌ی کلاسیوس - کلابیرون (معادله ۲) محاسبه شد. منحنی‌های ایزوترم حاصل از انطباق مدل هندرسون (شکل ۴) به خاطر کم‌خطا بودن در محاسبه‌ی مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب به کار گرفته شد و نتایج رضایت‌بخشی نیز حاصل شد. منحنی تغییرات مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب با مقدار رطوبت، در شکل ۶ نمایش داده شده است. با ملاحظه‌ی منحنی به دست آمده از شکل ۶ و نوع تابعیت مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب به مقدار رطوبت، واضح است که حرارت خالص ایزواستریک جذب بر اثر افزایش مقدار رطوبت کاهش می‌یابد. در محدوده‌ی ۰٫۲ تا ۰٫۲۵ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم جامد خشک) از مقدار رطوبت بررسی شده، مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب به ترتیب از ۳۳٫۳۴ تا ۲٫۹۸۸ (کیلوژول بر مول) متغیر است. با ادامه‌ی این بررسی به‌ازای مقادیر رطوبت بالاتر، منحنی تغییرات مقدار حرارت خالص ایزواستریک جذب در امتداد محور مقدار رطوبت تقریباً ثابت می‌شود. این مقدار که مبین انرژی پیوندی آب با ماده است نشان می‌دهد که در رطوبت‌های پایین، آب پیوند خیلی قویتری با ماده دارد و جدا کردن آن از ماده متحمل صرف انرژی بیشتری است. با افزایش مقدار رطوبت، انرژی پیوندی آب با ماده ضعیف‌تر و آزدسازی آن مستلزم انرژی کم‌تری است تا حدی که رطوبت موجود در ماده به سمت آب آزاد میل می‌کند و جداسازی آن با صرف کم‌ترین مقدار انرژی ممکن امکان‌پذیر است.

منابع

1. Aviara, N. A., Ajibola, O. O., & Dairo, U. O. Thermodynamics of moisture sorption in sesame seed. *Biosystems Engineering*, **83**(4), pp. 423-431 (2002).
2. Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. "Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods", *Journal of Food Sci*, **50**, pp. 385-391 (1985).
3. Stencl, J. "Modelling the water sorption isotherms of yoghurt powder spray", *mathematics and Computers in Simulation*, **65**, pp. 157-164 (2004).
4. Aviara, N. A., Ajibola, O. O., & Oni, S. A. Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean. *Biosystems Engineering*, **34**, pp.179-190 (2004).
5. Sanni, L. O., Atere, C. & Kube, A. "Moisture Sorption Isotherms of Fufu and Tapioca at Different Temperatures". *Journal of Food Engineering*, **34**, pp. 203-212 (1997).
6. Chen, C. "Obtaining the isosteric sorption heat directly by sorption isotherm equations". *Journal of Food Engineering*, pp. 1-8, (2005).
7. Kaymak, E. F., & Gedic, A. "Sorptions isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes"., *Lebensm.-Wiss. u.-Technol*, **37**, pp. 429-438 (2004).
8. Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. "Water sorption isotherms of starch powders Part 1: mathematical description of experimental data". *Journal of Food Engineering*, **61**, pp. 297-307 (2004 a).
9. Boki, K., & Ohno, S. "Equilibrium Isotherm Equation to Represent Moisture Sorption on Starch", *Jourtnal of Food Sci*, **56**, pp. 1106-1110 (1991).
10. Prothon, F., & Ahrne, M. L. "Application of the Guggenheim Anderson and DE Boer Model to Correlate Water Activity and Moisture Content during Osmotic Dehydration Of Apples". *Journal of Food Engineering*, **61**, pp. 467-470 (2004).
11. Figueira, G.M., Park, K. J., Brod, F. P.R., & Honorio, S. L. "Evaluation of Desorption Isotherms, Drying Rates and Inulin Concentration of hictory Roots without Enzymatic Inactivation". *Journal of Food Engineering*, **63**, pp. 273-280 (2004).
12. Alhamdan, A. M., & Hassan, B.H. "Water Sorption Isotherms of Date Cultivar and Storage Temperature". *Journal of Food Engineering*, **39**, pp. 301-306 (1999).
13. Tsami, E., Marinos, D., & Marolis, Z. B. "Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots". *Journal of Food Sci.*, **55**, pp. 1594-1598 (1990).
14. Bronlund, J., & Paterson, T. "Moisture Sorption Isotherms for Crystalline, Amorphous and Predominantly Crystalline Lactose Powders". *International Dairy Journal*, **14**, pp. 247-254 (2004).
15. Chung, D. S., & Pfost, H. B. Part II: Development of the general isotherm equation. *Transactions of the ASAE*, pp. 552-554 (1967 b).
16. Akanbi, C. T., Adeyemi, R. S., & Ojo, A. "Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices". *Journal of Food Engineering*, pp. 1-7 (2005).
17. Kaymak-Ertekin, F., & Sultanoglu, M. "Moisture sorption isotherm characteristics of peppers". *Journal of Food Engineering*, **47**, pp. 225-231 (2001).
18. McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. "Thermodynamic properties of moisture sorption of potato". *Journal of Food Engineering*, **60**, pp. 157-165 (2003).
19. Tsami, E., "Net Isosteric Heat in Dried Fruits". *Journal of Food Engineering*, **14**, pp. 327-335 (1991).
20. Noorlidah Abdullaha, A. Nawawia, I. Othman "Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity". *Journal of Stored Products Research*, **36**, pp. 47-54 (2000).