

بررسی دمای خیساندن در فرآیند پاربولینگ بر دمای ژلاتیناسیون نشاسته برنج فجر شهرستان گرگان: روش مدلسازی نفوذ جرمی آب درون دانه

سید میثم سلطانی زنوزی^{a*}

^a کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده داروسازی، واحد علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

DOI: 10.30495/jftn.2022.68193.11209

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20080123.1401.20.1.6.0>

۷۱

چکیده

مقدمه: فرآیند پاربولینگ، هیدروترمال شلتوک و یا برنج قهوه‌ای از جمله فرآیندهای مهم در صنعت برنج است و شامل سه مرحله اصلی خیساندن در آب، بخاردهی و در نهایت خشک کردن دانه‌ها می‌باشد. با توجه به افزایش هضم پذیری دانه‌ها به دلیل ژلاتیناسیون نشاسته، دستیابی به یک سطح ژلاتیناسیون مناسب، فرآیند خیساندن یک مرحله اساسی و ضروری در پاربولینگ است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش واریته برنج فجر از مزارع کشاورزی شهر گرگان جمع‌آوری گردید و در دماهای 35، 45، 55 و 60 درجه سانتی‌گراد خیسانده شدند. در مقاطع زمانی مختلف نمونه‌گیری انجام شد. دمای ژلاتیناسیون دانه‌های برنج فجر قبل از انجام فرآیند پاربولینگ با محاسبه ثابت نفوذ جرمی آب شلتوک‌ها با مدل فیک مدلسازی استفاده شد. سپس تعیین دمای تقریبی ژلاتیناسیون دانه‌ها با معادله آرنیوس تعیین شد.

یافته‌ها: داده‌های بدست آمده از جذب، بر حسب محتوای رطوبت خشک تحت شرایط آزمایشگاهی با معادله فیک برازش مناسبی داشت و این مدل رفتار جذب آب نمونه‌ها را بطور مناسبی توضیح می‌دهد. خیساندن در دماهای بالاتر منجر به جذب آب سریع‌تر شد. نحوه جذب آب دانه‌ها، نشان داد در دمای 60 درجه سانتی‌گراد، دانه‌ها تمایلی جهت رسیدن به رطوبت تعادلی ندارند و یک روند نزولی در نمودار جذب آنها مشاهده شد. همچنین با افزایش دما، ثابت نفوذ جرمی افزایش یافت. ضریب نفوذ دانه قهوه‌ای ۷/۲ برابر شلتوک و ضریب نفوذ دانه سفید، ۱/۴ برابر دانه قهوه‌ای بود. ضریب تعیین و متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) بدست آمده برای هر شرایط دمایی خیساندن، نشان داد که پوستگیری شلتوک تا رسیدن به دانه قهوه‌ای و سپس خیساندن دانه قهوه‌ای به جای شلتوک می‌تواند موثرتر واقع شود.

نتیجه‌گیری: با استفاده از گراف و معادله آرنیوس بهینه شرایط خیساندن دانه‌های فجر به مدت 2 ساعت در دمای 45 درجه سانتی‌گراد تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: برنج، پاربولینگ، خیساندن

بررسی دمای خیساندن در فرآیند پاربولینگ بر دمای ژلاتیناسیون نشاسته برنج

مقدمه

برنج (*Oryza sativa L*) غذای اصلی تقریباً نیمی از جمعیت جهان است و حدوداً ۲۰ درصد از برنج تولید شده جهانی برای تولید برنج پاربولینگ استفاده می‌شود. فرآیند پاربولینگ، فرآیند هیدروترمال شلتوک و/یا برنج قهوه‌ای، شامل خیساندن برنج خام در آب داغ، بخارپز کردن برای تکمیل ژلاتینه شدن و خشک کردن است (Onmankhong *et al*, 2021). پاربولینگ منجر به تغییرات عمیق در خواص فیزیکی شیمیایی و عملکردی برنج می‌شود. گرانول‌های نشاسته به دلیل ژلاتینه شدن متورم می‌شوند، ساختار پروتئین به دلیل دناتوره شدن و اتصال متقابل دی سولفیدی مختل می‌شوند که در نتیجه کمپلکس لیپید - آمیلوز تشکیل می‌شود، بعلاوه فرآیند پاربولینگ سبب انتشار ذاتی ویتامین‌ها و مواد معدنی محلول در آب از سبوس به آندوسپرم می‌شود که کیفیت تغذیه‌ای را بهبود می‌بخشد؛ همچنین تغییرات فیزیکی شیمیایی در طول فرآیند پاربولینگ باعث شفافیت بیشتر و رنگ کهربایی در برنج می‌شود (Nawaz *et al.*, 2018). بعلاوه پاربولینگ منجر به افزایش واکنش نشاسته مقاوم و کاهش شاخص گلیسمی پایین می‌شود که ارتقای سلامت مصرف کننده را به دنبال دارد (Kale *et al.*, 2017). مرحله خیساندن در فرآیند پاربولینگ، هضم پذیری دانه خام را بیشتر می‌نماید که این امر به دلیل ژلاتیناسیون نشاسته است. پس جهت نائل شدن به یک سطح ژلاتیناسیون مناسب، فرآیند خیساندن یک مرحله اساسی و ضروری در پاربولینگ است. حداقل 40 kg/kg 0 تا 45/0، بر اساس وزن خشک، محتوی رطوبتی بسته به نوع برنج (معمولاً برای ژلاتینه شدن کامل در داخل دانه مورد نیاز است) (Bello *et al.*, 2004 ; Resio *et al.*, 2005). خیساندن یک فرآیند آهسته است که با انتشار آب در دانه کنترل می‌شود. بنابراین خیساندن در دمای اتاق ممکن است باعث ایجاد آلودگی میکروبی شود که بر رنگ، طعم و بوی محصول تأثیر می‌گذارد. در پاربولینگ سنتی، مرحله خیساندن در دمای اتاق انجام می‌گردد و ۱ تا ۲ روز طول می‌کشد. امروزه، خیساندن در آب گرم یک روش رایج برای کوتاه کردن زمان خیساندن است (Nawaz *et al.*, 2018). خیساندن در دمای ژلاتینه شدن نشاسته و یا بالاتر از آن، میزان هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد. تفاوت در

میزان جذب آب، با ایجاد تفاوت در شیب خط منحنی سینتیک رطوبتی کاملاً قابل تشخیص است. بنابراین با افزایش دما روند کلی افزایشی در میزان جذب آب دیده می‌شود. جذب آب اضافی، جدا شدن سبوس، پخت کامل دانه، در دمای ژلاتینه شدن و یا بالاتر از آن، کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد (Igathinathane *et al.*, 2005). از سوی دیگر دماهای خیلی پایین (مثلاً شرایط دمایی محیط) نیز خیلی مناسب نیستند چرا که هم زمان زیادی صرف می‌شود و هم احتمال آلودگی میکروبی وجود دارد؛ بنابراین دمای خیساندن کمتر از دمای ژلاتینه شدن نشاسته و بالاتر از دمای محیط، برای به حداقل رساندن شکستن دانه‌ها و به دنبال آن و نشست مواد مغذی به آب توصیه می‌شود (Bello *et al.*, 2004). همچنین قابل ذکر است که، مرحله خیساندن فاکتوری موثری در فرآیند پخت دانه است. چنانچه در حین خیساندن جذب آب دانه کم باشد، نشاسته در مرکز دانه کاملاً ژلاتینه نمی‌شود و منجر به سخت شدن بافت نهایی برنج می‌شود (Horigane *et al.*, 2006). استفاده از پیش تیمارهای مختلف و یا استفاده از بخار در کاهش زمان مرحله خیساندن انجام شده است (Taghinezhad *et al.*, 2015; Yıldırım and Öner, 2015). اما مطالعات تنها بر پایه دمای مرحله خیساندن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. فاکتور تعیین کننده در فرآیند جذب آب شلتوک، ثابت نفوذ جرمی است که این کمیت، مشخص کننده تأثیر شرایط خیساندن می‌باشد. مشخص شده است که ثابت نفوذ جرمی به عوامل و شرایط مختلفی مثل دما، فشار، وارپته و غیره در فرآیند خیساندن مرتبط می‌باشد. بنابراین این پژوهش با هدف برآوردی تقریبی از دمای ژلاتیناسیون دانه‌های برنج فجر قبل از انجام فرآیند پاربولینگ با محاسبه ثابت نفوذ جرمی آب شلتوک‌ها با مدل فیک مدلسازی و سپس تعیین دمای تقریبی ژلاتیناسیون دانه‌ها با معادله آرنیوس انجام شد.

مواد و روش‌ها

- تهیه شلتوک برنج

شلتوک وارپته فجر از مزارع شالیکاری شهرستان گرگان تهیه گردید و پس تأیید وارپته توسط موسسه تحقیقات برنج کشور واقع در آمل برای انجام تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. پس از تمیز نمودن شلتوک‌ها با استفاده

روش Sridhar و Manohar (2003) محاسبه شد. بدین صورت که ابتدا حجم 50 عدد دانه با استفاده از پیکنومتر اندازه‌گیری و سپس با تقسیم عدد به دست آمده بر 50، حجم میانگین تقریبی یک دانه محاسبه شد. سپس با فرض اینکه دانه یک کره کامل است، شعاع معادل کره هم حجم دانه نیز با استفاده از معادله (2) محاسبه شد.

(2)

که در آن حجم میانگین یک دانه شلتوک : / (شعاع معادل کره هم حجم شلتوک)

پس از آن که تمامی ثوابت اندازه‌گیری شد، با خطی سازی معادله (1) بدین صورت که محتوی رطوبت تابعی از زمان باشد، یک تابع خطی درجه اول به دست آمد که پس از جایگذاری زمان و رطوبت های مختلف در آن، مقدار D_{ef} به عنوان شیب خط تابع برای هر دانه و دمای معین محاسبه شد.

جهت داشتن درک درستی از میزان خوبی برازش داده‌ها با مدل، متوسط ریشه مربعات خطا (RSME) بین محتوی رطوبت داده های تجربی و محتوی رطوبت برآورد شده از مدل، با استفاده از معادله (3) محاسبه شد. هرچه میزان آن کمتر باشد، به معنی صحت و اعتبار برازش مدل می‌باشد.

(3)

که در آن :تعداد ثوابت مدل : / محتوی رطوبت (db) به دست آمده حین خیساندن : / محتوی رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل (db)

- تعیین تقریبی دمای ژلاتیناسیون دانه‌ها

جهت به دست آوردن دمای ژلاتیناسیون دانه، با استفاده از اطلاعات قسمت قبل (یعنی بخش خیساندن دانه) و معادله آرنیوسی (4)، ثابت واکنش نفوذ (D_{ef})، محاسبه شد و پس از تعیین این ثابت و رسم نمودار این ثابت در مقابل زمان، دمای تقریبی ژلاتیناسیون دانه ها نیز محاسبه شد (Bello et al., 2006).

(4)

که در آن: ضریب نفوذ جرمی برای هر دما: / (ثابت بخصوص این وارسته از شلتوک: / (انرژی فعال سازی

از دستگاه پوست‌گیر) به‌سازان صنعت- ایران (به دانه قهوه‌ای تبدیل شدند. بخش دیگری از شلتوک‌ها نیز تا رسیدن به دانه سفید پوست‌گیری شدند. در نهایت دانه‌های قهوه‌ای و سفید بدست آمده جهت انجام آزمایشات به دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل شدند.

- خیساندن دانه‌ها

۵۰ گرم از شلتوک، دانه قهوه‌ای و دانه سفید برنج فجر، هر کدام بطور جداگانه، در ۷۵ میلی‌لیتر آب تا رسیدن به رطوبت اشباع تعادلی در دمای ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد خیسانده شدند. به منظور تأمین دماهای مورد بررسی، نمونه‌ها درون آون (شیماز - ایران) منتقل شدند. در مقاطع زمانی مختلف از دانه‌های خیسانده شده، نمونه برداری انجام و محتوی رطوبت آنها با استفاده از روش استاندارد (2006) AOAC- 925.10 اندازه‌گیری شد. این عمل تا رسیدن محتوی رطوبت دانه به رطوبت تعادلی یعنی شرایطی که دانه امکان جذب آب بیشتر را نداشته باشد (Bello et al., 2006) پس از محاسبه رطوبت دانه‌های خیسانده در زمان‌های مختلف، نمودار سینتیک جذب رطوبت برای شلتوک، دانه قهوه‌ای و دانه سفید، بطور جداگانه رسم شد.

- مدلسازی فرآیند جذب آب شلتوک، دانه قهوه ای

و دانه سفید

جهت مدل سازی فرآیند جذب آب از مدل فیک مطابق با معادله (1) استفاده شد.

(1)

که در آن: محتوی رطوبت در هر لحظه: / (db) محتوی رطوبت تعادلی: / (db) محتوی رطوبت اولیه (db) : / ضریب نفوذ جرمی: / () زمان : R / (s) شعاع معادل کره هم حجم دانه (m)

همان طور که عنوان شد هدف اصلی در این مدل سازی، یافتن مقدار ثابت نفوذ جرمی (i)، برای دانه‌ها در دماهای مختلف می‌باشد. بنابراین نیاز است تمام اثبات‌های معادله (1) را داشته باشیم. مقادیر محتوی رطوبت اولیه، نهایی و رطوبت در هر لحظه از بند (2-2) محاسبه شدند. همچنین، مقدار شعاع معادل کره هم حجم دانه نیز مطابق

بررسی دمای خیساندن در فرآیند پاربولینگ بر دمای ژلاتیناسیون نشاسته برنج

که به راحتی از شیب نمودارها قابل تشخیص است.

واکنش نفوذ جرمی آب: / () ثابت جهانی گازها: / () دمای مطلق (K)

- محاسبه ثابت نفوذ جرمی شلتوک، دانه قهوه‌ای و سفید در دماهای مختلف خیساندن

ثابت نفوذ جرمی () و پارامترهای آماری همچون ضریب تعیین () و متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE)، برای تیمارهای مختلف مورد آزمون به کمک نرم‌افزار Polymath 6.0 و با برازش داده‌های رطوبتی در معادله (1) بدست آمد. نتایج بدست آمده در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. با توجه نتایج ثابت نفوذ جرمی، با افزایش دما از ۳۵ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، روند افزایشی در تمامی تیمارها مشاهده شد.

یافته‌ها

- بررسی سینتیک جذب آب شلتوک و دانه‌ها در دماهای مختلف

نتایج مربوط به سینتیک جذب آب شلتوک‌ها و دانه‌های قهوه‌ای و سفید در شکل ۱ نشان داده شده است. بنابر نتایج، فرآیند جذب آب شلتوک، دانه قهوه‌ای و دانه سفید برای همه‌ی شرایط دمایی، در دقایق اولیه با سرعت بسیار بالایی صورت گرفت، اما با گذشت هرچه بیشتر زمان خیساندن، سرعت جذب آب شلتوک و دانه‌ها کاهش یافت

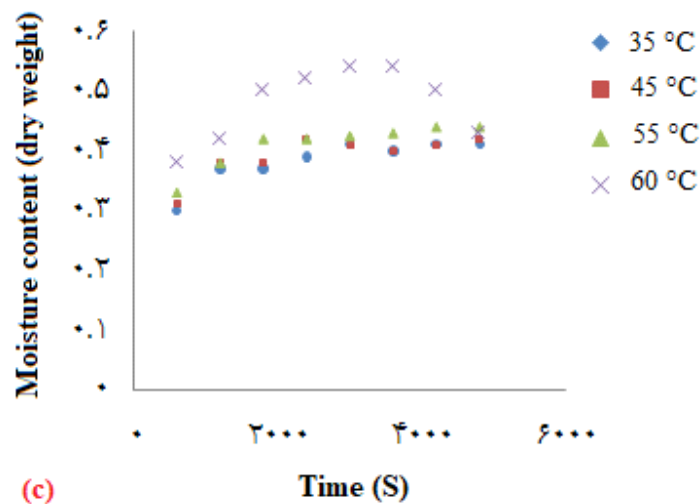


Figure 1- Moisture absorption kinetics of rice Fajr variety (a): paddy grain / (b): brown grain / (c): white grain of rice
شکل ۱- سینتیک جذب رطوبت برنج واریته فجر: (a) شلتوک دانه / (b) دانه قهوه‌ای / (c) دانه سفید

جدول ۱- پارامترهای آماری و نتایج مدل سازی خیساندن شلتوک، دانه قهوه‌ای و سفید واریته فجر

Table 1- Statistical parameters and modeling results of soaking of paddy, brown and white beans of Fajr variety

RMSE	R ²	$10^3 (m^2/s) \cdot D \times 11$	Equilibrium humidity (percentage by dry weight)	Grain	Temperature (°C)
0.15	0.98	63.03 ± 0.10	41	paddy	35
0.29	0.98	35.20 ± 0.20	40	Brown grain	
0.27	0.99	62.32 ± 0.16	41	White grain	
0.9	0.99	79.03 ± 0.10	43	paddy	45
0.25	0.99	14.00 ± 0.70	42	Brown grain	
0.30	0.98	12.68 ± 0.21	42	White grain	
0.11	0.99	25.18 ± 0.20	43	paddy	55
0.35	0.98	68.29 ± 0.80	44	Brown grain	
0.23	0.99	24.56 ± 0.22	44	White grain	
0.29	0.98	17.60 ± 0.60	40	paddy	60
0.55	0.98	67.11 ± 0.90	45	Brown grain	
1.01	0.92	42.30 ± 0.37	43	White grain	

نتایج داده‌های جذب آب شلتوک (شکل ۱)، دانه قهوه‌ای و دانه سقید، بر حسب محتوای رطوبت خشک تحت شرایط آزمایشگاهی با معادله فیک برازش مناسبی داشت و این مدل رفتار جذب آب نمونه‌ها را به طور مناسبی توضیح داد و لذا معادله فیک می‌تواند برای تخمین محتوای رطوبت شلتوک، دانه قهوه‌ای و دانه سقید در زمان و دمای اعمال شده دلخواه شرایط آزمایشی در نظر گرفته شده، به کار برده شود. نفوذ آب درون دانه‌ها به دلیل گرادیان رطوبتی اتفاق می‌افتد. جذب آب به داخل دانه‌ی برنج می‌تواند مربوط به یک فرآیند نفوذ باشد که در آن یک نسبت از آب جذب شده در خلال واکنش آب - نشاسته (یعنی فرآیند ژلاتیناسیون)، تثبیت شده است. این چنین واکنشی هنگامی انجام می‌شود که تمایل نشاسته به آب به میزان کافی بالاست (Bello *et al.*, 2004). نفوذ رطوبت به درون دانه شلتوک حین فرآیند خیساندن به دلیل اختلاف رطوبت بین سطح و مرکز دانه و نیز فرآیند انتشار حین ژلاتیناسیون اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، فرآیند جذب آب شلتوک، دانه قهوه‌ای و دانه سفید برای همه‌ی شرایط دمایی، در دقایق اولیه با سرعت بسیار بالایی صورت گرفت، اما با گذشت هرچه بیشتر زمان خیساندن، سرعت جذب آب شلتوک و دانه‌ها کاهش یافته به راحتی از شیب نمودارها قابل تشخیص است. این کاهش نرخ جذب رطوبت تا جایی ادامه می‌یابد که رطوبت دانه‌ها به حد اشباع برسد. با این حال سرعت جذب آب در تمام دماهای مورد بررسی متفاوت بود. بطوریکه سرعت نفوذ آب

- بررسی توانایی مدل در برازش داده‌ها

جهت بررسی این مطلب که آیا برازش داده‌های رطوبتی با مدل فیک موفقیت‌آمیز بوده‌اند یا خیر، از داده‌های جدول ۱ استفاده شد. دو پارامتر آماری ضریب تعیین (R) و متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) برای هر شرایط دمایی خیساندن شلتوک و دانه‌ها در جدول نشان داده شده است. بنابر نتایج، با افزایش دما از ۳۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد RMSE به ترتیب در محدوده 92/0-99/0 و 01/1-09/0 بودند که در هر دو مورد حد قابل قبول و مناسب را داشتند. ولی با توجه به این شکل ۱ مشاهده شد که مقادیر رطوبت محاسبه شده در دماهای مختلف در طول آزمایش، با مقادیر محاسبه شده با مدل فیک، اندکی متفاوت بود.

- تعیین تقریبی دمای ژلاتیناسیون

مطابق معادله (۴)، شیب نمودار شکل ۲ بیانگر انرژی فعال سازی واکنش نفوذ آب به درون دانه می‌باشد. با توجه به نمودار، در محدوده دمایی ۵۵ درجه سانتی‌گراد یک تغییر ناگهانی را در شیب نمودار مشاهده شد. این تغییر نفوذ آب به درون دانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد و منجر به تغییرات قابل توجهی در ساختار دانه می‌گردد.

بحث

- بررسی سینتیک جذب آب شلتوک و دانه‌ها در دماهای مختلف

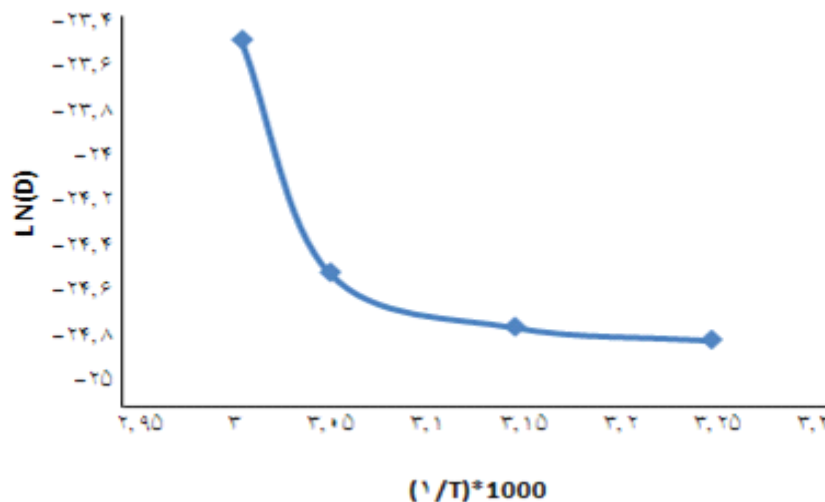


Figure 2- Arrhenius scheme of mass penetration.

شکل ۲- طرح آرنیوسی ثابت نفوذ جرمی.

بررسی دمای خیساندن در فرآیند پاربولینگ بر دمای ژلاتیناسیون نشاسته برنج

دانه‌ها، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بود که نتایج نشان داد در این دما دانه‌ها تمایلی به رسیدن به رطوبت تعادلی ندارند و میزان رطوبت آن دائماً افزایش می‌یابد. پس از آن، رسیدن نمودار به یک قله (یعنی در محتوی رطوبتی حدود ۵۷/۰-۵۵/۰ درصد) روند نزولی در نمودارها مشاهده می‌گردد. و این شیب زیاد در جذب آب، ناشی از جدا شدن پوسته از دانه و جذب راحت‌تر آب توسط دانه و پخت و ژلاتیناسیون کامل دانه‌ها می‌باشد (Igathinathane *et al.*, 2005).

- ثابت نفوذ جرمی شلتوک، دانه قهوه‌ای و سفید در دماهای مختلف خیساندن

با توجه نتایج ثابت نفوذ جرمی، با افزایش دما از ۳۵ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد، روند افزایشی در تمامی تیمارها مشاهده شد (جدول ۱). ضریب نفوذ دانه قهوه‌ای به طور متوسط ۷/۲ برابر شلتوک و نیز ضریب نفوذ دانه سفید، به طور متوسط، ۱/۴ برابر دانه قهوه‌ای بود. اینگونه نتیجه گیری می‌شود که با پوست‌گیری دانه، سرعت جذب آب در دانه افزایش می‌یابد. زیرا، لایه‌های مقاوم به نفوذ (که به صورت سدی در مقابل انتقال آب به درون دانه عمل می‌نمایند)، کاهش یافته و از این طریق سهولت افزایش رطوبت دانه و به دنبال آن سطح رطوبتی مورد نظر را حاصل می‌شود (Bello *et al.*, 2007). نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج مطالعات انجام شده بر روی فرآیند جذب آب توسط شلتوک و دانه برنج مطابقت داشت (Sridhar and Manohar, 2003; Bello *et al.*, 2004; Perez *et al.*, 2011).

- توانایی مدل در برازش داده‌ها

دو پارامتر آماری ضریب تعیین (R) و متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) برای هر شرایط دمایی خیساندن شلتوک و دانه‌ها در جدول ۱، جهت بررسی درستی برازش داده‌های رطوبتی با مدل فیک، نشان داده شده است. هر چه میزان، بیشتر، به عدد ۱ نزدیک‌تر و میزان RMSE کوچک‌تر باشد، نشان دهنده برازش مناسب داده‌ها با مدل انتخاب شده است. بنابر نتایج، با افزایش دما از ۳۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و RMSE به ترتیب در محدوده 99/0-92/0 و 01/1-09/0 بودند که در هر دو مورد حد قابل

به درون دانه در دماهای بالا نسبت به دماهای پایین‌تر، بیشتر است. این مشاهدات، با مطالعات قبلی که بر روی فرآیند جذب آب شلتوک و دانه برنج صورت پذیرفته بود نیز مطابقت داشت (Sridhar and Manohar, 2003; Resio *et al.*, 2005; Horigane *et al.*, 2006; Bakalis *et al.*, 2009).

جذب سریع اولیه آب (برای تمام دماهای مورد بررسی در مرحله خیساندن)، احتمالاً به دلیل است که لوله‌های کاپیلاری نزدیک سطح با جذب سریع آب پُر می‌شوند، شایان ذکر است که این زمان در مقایسه با کل زمان خیساندن بسیار کوچک به نظر می‌رسد. درحالی‌که جذب آب کندتر در مراحل بعدی ممکن است متأثر از استخراج و افزایش جایگزینی مواد محلول با آب جذب شده باشد (Perez *et al.*, 2011). نتایج نشان داد، در دماهای بالاتر، رطوبت تعادلی در مقایسه با دماهای پایین‌تر، در حدود ۱ درصد وزن خشک، کم شد. این امر ممکن است به دلیل افزایش استخراج، جایگزینی و از دست رفتن مواد محلول توسط آب نفوذی باشد. به علاوه افزایش نرخ نفوذ در دماهای خیساندن بالاتر به دلیل کاهش مقاومت به نفوذ می‌باشد. همچنین وجود فضای خالی میان پوسته و آندوسپرم منجر به جذب آب سریع‌تر دانه‌ها می‌گردد (Bello *et al.*, 2004). این موضوع را می‌توان با مقایسه نمودار جذب آب شلتوک (شکل ۱-a) و دانه سفید (شکل ۲-b) مشاهده نمود. برای مثال، در بررسی جذب آب توسط شلتوک، رسیدن به محتوی رطوبتی ۴۰ درصد در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، حدود ۵/۱۲ ساعت به طول انجامید، اما خیساندن در ۶۰ درجه سانتی‌گراد، ۶/۳ ساعت به طول انجامید. درحالی‌که مدت زمان لازم برای دانه قهوه‌ای در دمای ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب ۲ ساعت و ۴۸ دقیقه بود. از سوی دیگر جذب آب در مرحله خیساندن دانه‌های سفید نیز به ترتیب ۵۰ و ۱۵ دقیقه در دمای ۴۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که دمای بالاتر، مقاومت دانه را به نفوذ آب کاهش می‌دهد در نتیجه فرآیند جذب آب و رسیدن به سطح رطوبتی مورد نظر، سریع‌تر صورت می‌پذیرد. نتایج بدست آمده با مطالعه Horigane و همکاران، (۲۰۰۶) همچنین Bello و همکاران (۲۰۰۷)، مطابقت داشت.

نکته قابل تأمل دیگر، در رابطه با نحوه جذب آب

دمایی کمتر از دمای ژلاتیناسیون دانه صورت گرفت. زیرا در دمای ژلاتیناسیون و بالاتر از آن، فرآیند جدا شدن پوسته از دانه، ژلاتیناسیون و پخت کامل دانه‌ها صورت می‌پذیرد بافتی نامناسب در دانه ایجاد می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که خیساندن دانه قهوه‌ای یا دانه بدون پوشینه نسبت به دانه خام، منجر به کاهش چشمگیر زمان خیساندن دانه‌ها و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را به دنبال داشت. با توجه به آنچه که گفته شد، شرایط بهینه برای خیساندن دانه‌های فجر مورد بررسی در این تحقیق طی فرآیند خیساندن پاربولینگ، ۲ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد بود.

منابع

- AOAC. (1975). Association of Official Agricultural Chemists. *Official methods of analysis* (Vol. 222). Washington, DC.
- Bakalis, S., Kyritsi, A., Karathanos, V. T. & Yanniotis, S. (2009). Modeling of rice hydration using finite elements. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 321-325.
- Bello, M., Tolaba, M. P. & Suarez, C. (2004). Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie - Food science and Technology*, 37(8), 811-816.
- Bello, M. O., Tolaba, M. P. & Suarez, C. (2007). Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking. *LWT-Food science and Technology*, 40(2), 313-318.
- Horigane, A. K., Takahashi, H., Maruyama, S., Ohtsubo, K. I., & Yoshida, M. (2006). Water penetration into rice grains during soaking observed by gradient echo magnetic resonance imaging. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 307-316.
- Igathinathane, C., Chattopadhyay, P. K. & Pordesimo, L. O. (2005). Combination soaking procedure for rough rice parboiling. *Transactions of the ASAE*, 48(2), 665-671.
- Kale, S. J., Nath, P. & Jha, S. K. (2017). Effects of parboiling steps on starch characteristics and glycemic index of basmati (PB1121) rice. *International Journal of Agriculture Sciences*, 9(49), 4826-4831.
- Nawaz, M. A., Fukai, S., Prakash, S. & Bhandari, B. (2018). Effect of soaking medium on the physicochemical properties of parboiled glutinous rice of selected Laotian cultivars. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1896-1910.
- Onmankhong, J., Jongyingcharoen, J. S. & Sirisomboon, P. (2021). The influence of processing parameters of parboiled rice on its physicochemical and texture properties. *Journal of*

قبول و مناسب را داشتند. ولی با توجه به این شکل ۱ مشاهده شد که مقادیر رطوبت محاسبه شده در دماهای مختلف در طول آزمایش، با مقادیر محاسبه شده با مدل فیک، اندکی متفاوت بود. بلو و همکاران، (۲۰۰۷)، احتمالاً این امر به این دلیل است که پوسته سیلیسی به راحتی خیس نمی‌خورد و از نفوذ آب به درون دانه جلوگیری می‌نماید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پوستگیری شلتوک تا رسیدن به دانه قهوه‌ای و سپس خیساندن دانه قهوه‌ای) به جای شلتوک (می‌تواند موثرتر باشد. زیرا زمان خیساندن کاهش یافته و انرژی بیشتری صرفه جویی می‌شود (Bello et al., 2004).

- تعیین تقریبی دمای ژلاتیناسیون

تعیین دمای ژلاتیناسیون جهت خیساندن شلتوک امری بسیار مهم به شمار می‌رود. در اینجا با استفاده از معادله (۴) و رسم طرح آرنیوسی ثابت نفوذ جرمی که محور عمودی آن مقادیر لگاریتمی ثابت نفوذ جرمی دماهای مختلف و محور افقی آن معکوس دما (بر حسب کلوین) است، به بررسی فرآیند ژلاتیناسیون دانه پرداخته شد. شیب نمودار شکل ۲ بیانگر انرژی فعالسازی واکنش نفوذ آب به درون دانه می‌باشد. در محدوده دمایی ۵۵ درجه سانتی‌گراد یک تغییر ناگهانی را در شیب نمودار مشاهده شد. این تغییر نفوذ آب به درون دانه را تحت تاثیر قرار می‌دهد و منجر به تغییرات قابل توجهی در ساختار دانه می‌گردد. مطالعات Turhan و همکاران (۲۰۰۲) همچنین Bello و همکاران، (۲۰۰۷)، این پدیده را به ژلاتیناسیون نشاسته ربط دادند. با این توضیحات حضور یک نقطه شکست در نمودار بیانگر آن است که مکانیسم واکنش به دلیل تغییر در سبک کریستالیزاسیون نشاسته تغییر می‌نماید. بنابراین دمای ژلاتیناسیون نشاسته وارپته برنج مورد آزمون تقریباً ۵۵ درجه سانتی‌گراد متعین شد.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در فرآیند پاربولینگ، خیساندن دانه‌ها در شرایط دمایی بالاتر از شرایط دمایی محیط، منجر به رسیدن سریع‌تر دانه‌ها به سطح رطوبتی مناسب قبل از فرآیند بخار دهی و در نتیجه صرفه جویی در وقت می‌گردد. البته باید توجه داشت که این خیساندن در

Texture Studies, 52(2), 219-227.

Perez, J. H., Tanaka, F. & Uchino, T. (2011). Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions. *Food Research International*, 44(9), 2615-2623.

Resio, A. N. C., Aguerre, R. J. & Suarez, C. (2005). Analysis of simultaneous water absorption and water–starch reaction during soaking of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 68(2), 265-270.

Sridhar, B. S. & Manohar, B. (2003). Hydration kinetics and energy analysis of parboiling Indica paddy. *Biosystems engineering*, 85(2), 173-183.

Taghinezhad, E., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. & Latifi, A. (2015). Effect of soaking temperature and steaming time on the quality of parboiled Iranian paddy rice. *International journal of food engineering*, 11(4), 547-556.

Turhan, M., Sayar, S. & Gunasekaran, S. (2002). Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 153-159.

Yıldırım, A. & Öner, M. D. (2015). Electrical conductivity, water absorption, leaching, and color change of chickpea (*Cicer arietinum* L.) during soaking with ultrasound treatment. *International Journal of Food Properties*, 18(6), 1359-1372.

Investigation of Soaking Temperature in Parboiling Process on Gelatinization Temperature of Fajr Rice Starch in Gorgan: A Method for Modelling the Mass diffusion of Water into Grain

S. M. Soltani Zenozi ^{a*}

^{a*} MSc of Food Science and Engineering, Medical Sciences Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 21 June 2022

Accepted: 6 July 2022

Abstract

Introduction: Rice parboiling process, hydrothermal process of paddy and / or brown rice are among the important processes in the rice industry and include three main stages of soaking in water, evaporation and drying. Due to the increased digestibility of grains following gelatinization, achieving a suitable level of gelatinization in the soaking stage is a basic and essential step in parboiling process.

Materials and Methods: In this study, Fajr rice varieties were collected from agricultural fields in Gorgan and soaked at temperatures of 35, 45, 55 and 60 °C. Sampling was performed at different time. The gelatinization temperature of rice grains was modelled by calculating the mass permeation constant (D_{ef}) of paddy water with Fick model. Then, the approximate temperature of grain gelatinization was determined by Arrinius equation.

Results: The data obtained from adsorption had a good fit in terms of dry moisture content under laboratory conditions with Fick equation and this model properly explained the water absorption behaviour of the samples. Soaking at higher temperatures resulted in faster water absorption. The water adsorption behaviour of the seeds showed that at a temperature of 60 °C, the seeds do not tend to reach equilibrium moisture and a downward trend was observed in their diagram. Also, with increasing temperature, the D_{ef} increased. The D_{ef} brown grain was 2.7 times that of paddy, while The D_{ef} with the grain was 4.1 times that of brown bean. The R^2 and RMSE obtained for each soaking temperature condition showed that Rice peeling until the brown grain reached and then soaking the brown grain (instead of paddy) could be more effective.

Conclusion: Using graph and Arrhenius equation, the optimal soaking conditions of Fajr grains for 2 hours at 45 °C were determined.

Keywords: Parboiling, Rice, Soaking.

* Corresponding Author: meisam.soltani.1996@gmail.com