

بررسی رفتار ویسکوالاستیک و وابسته به زمان رب گوجه فرنگی

امیر حیدری نسب^{a*}، وحید مقدم نانس^b

^aدانشیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

^bدانشجوی دکتری مهندسی شیمی - صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۷/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۲۱

چکیده

مقدمه: در این مقاله سعی شده به بررسی رفتار رئولوژیکی رب گوجه فرنگی از نظر ویسکوالاستیک و خواص وابسته به زمان آن پرداخته شود تا بتوان از این پارامترها در طراحی واحدهای مختلف تولید رب گوجه فرنگی به صورت صنعتی کمک گرفت.

مواد و روش ها: رفتار رئولوژیکی رب گوجه فرنگی در دستگاه ویسکومتر بروکفیلد اسپیندل دار مورد بررسی قرار گرفته است.

یافته ها: منحنی رفتار تنش (ویسکوزیته ظاهری) نسبت به زمان در نرخ کرنش های متفاوت جهت بررسی رفتار وابسته به زمان و رفتار ویسکوالاستیک نمونه ها فراهم گردید.

نتیجه گیری: نتایج نشان می دهد که در قسمت وابسته به زمان، نمونه از رفتار تیکسوتروپیک (رقیق شونده با زمان) تبعیت می نماید. جهت بررسی رفتار ویسکوالاستیک از دو آزمایش فرارفت تنش در زمان اعمال نرخ کرنش و کاهش تدریجی تنش در زمان حذف نرخ کرنش که هر دو حاکی از خاصیت ویسکوالاستیک بودن نمونه مورد نظر می باشد، استفاده گردید و در نهایت یک مدل ریاضی که بیانگر هر دو رفتار ویسکوالاستیک و وابسته به زمان برای رب گوجه فرنگی می باشد، ارائه شده است.

واژه های کلیدی: تیکسوتروپیک، رب گوجه فرنگی، رئولوژی، ویسکوالاستیک

مقدمه

بخش عمده گوجه فرنگی جهان در راستای تولید رب گوجه فرنگی مصرف می شود که این ماده در بسیاری از مواد غذایی مانند سس، سوپ و کچاپ مورد استفاده قرار می گیرد (Valencia et al., 2003).

رب گوجه فرنگی از ذرات جامد معلق (پالپ) در محلول آبی (سرم) تشکیل یافته (Yoo & Rao, 1994) که بعد از جدا کردن پوست و دانه و تغلیظ آب گوجه فرنگی حاصل می گردد و دارای مواد جامد قابل حل طبیعی در حدود ۲۴ درصد یا بیشتر است (Hayes et al., 1998). ویسکوزیته محصول یکی از شاخص های مهم در ارزیابی کیفیت کلی و مقبولیت مصرف کننده می باشد. بنابراین اطلاع داشتن از ویسکوزیته یا تنش برشی در هر شرایطی هم برای طراحی واحدهای مختلف و هم برای کنترل کیفیت مهم می باشد. به این منظور نیاز به آگاهی از رفتار جریان این ماده می باشد. مدل های تجربی مختلفی توسط محققان (Sharma et al., 1996) ارائه گردیده تا رفتار جریانی رب گوجه فرنگی را مشخص کنند (هرشل بالکلی^۱؛ کیسون و...^۲) که بسیاری از این مدل ها رفتار رئولوژیکی را با در نظر گرفتن تأثیرات سایز مش صافی ها و دمای خرد کردن (Sanchez et al., 2003) یا میزان هموژناسیون (Xu et al., 1986) یا تأثیرات غلظت مواد جامد و دما (Barbara & El-Omri, 2009) بررسی می کند. لذا در همه مدل های بدست آمده فرض بر این بوده که رب گوجه فرنگی رفتار مستقل از زمان را دارا می باشد (Bayod et al., 2007). بنا به گفته محققان، تحقیقات در مورد رفتار وابسته به زمان و ویسکوالاستیک بسیار اندک می باشد (Bayod et al., 2007) و در اندک تحقیقات موجود مدل های ارائه شده بر اساس توابع کاهش نمایی بوده (De Kee et al., 1983). نتایج تحقیقات نشان می دهد که محصولات حاصل از گوجه فرنگی مانند رب گوجه فرنگی از تابع کاهش نمایی پیروی نمی کند (Bayod et al., 2007). لذا در این مقاله سعی شده رفتار وابسته به زمان و ویسکوالاستیک رب گوجه فرنگی به صورت مجزا بررسی گردیده و با استفاده از روابط مناسب (Steffe, 1996) پارامترهای رئولوژی وابسته به زمان که رفتار تیکسوتروپیک را دارا می باشد و همچنین اثر شروع و خاتمه تنش بر ماده

که در پارامترهای ویسکوالاستیک مؤثر است را مدل کرد تا بتوان از این مدل ها در طراحی واحدهای مختلف تولید رب گوجه فرنگی از قبیل همزن ها، مبدل های حرارتی و تبخیر کننده ها کمک گرفت.

مواد و روش ها

- آماده سازی نمونه

گوجه فرنگی تازه از نوع Rio Grande در اندازه و شکل و رنگ مشابه به عنوان ماده اولیه برای تهیه رب گوجه فرنگی با مشخصات زیر جهت انجام آزمایشات استفاده شد: مواد جامد محلول در ۲۰ درجه سانتیگراد = ۵/۲۵٪، pH=۴/۱ و اسیدیته کل = ۰/۳۸٪. سپس ماده اولیه در حوض آبی شستشو داده شد و توسط دستگاه خرد کن به تکه های کوچک تبدیل شد سپس توسط حرارت دهی اولیه به میزان ۸۵ درجه سانتیگراد وارد مبدل حرارتی گردید بعد از حرارت اولیه جهت جدا کردن دانه و پوسته به صافی دو مرحله ای هدایت شد و در نهایت آب گوجه فرنگی حاصل به منظور تغلیظ تا ۲۵±۰/۵ بریکس وارد تبخیر کننده دو مرحله ای گردید.

- روش تعیین غلظت

برای اندازه گیری میزان غلظت نمونه، دستگاه رفاکتومتر ATA مورد استفاده قرار گرفت لذا مقداری از نمونه داخل کاغذ صافی ریخته شده و با فشار فیزیکی عصاره خارج شده داخل رفاکتومتر قرار می گیرد و مقدار درصد مواد جامد (غلظت) توسط این دستگاه تعیین گردید.

- اندازه گیری ویسکوزیته و درصد گشتاور

جهت اندازه گیری ویسکوزیته و درصد گشتاور نمونه مورد نظر، از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد DV-II⁺ Programmable استفاده گردید. اسپیندل دیسکی مورد استفاده از نوع RV6 انتخاب گردید و پنج نرخ کرنش برای بدست آوردن پارامترهای معادله پاورلا (K,n) و چهار نرخ کرنش برای بدست آوردن پارامترهای رفتار تیکسوتروپیک و ویسکوالاستیک برای نمونه مورد نظر اعمال گردید لازم به ذکر است آزمایشات در دمای ۱۸ درجه سانتیگراد و در دو تکرار برای نمونه مورد نظر انجام گرفت و نتایج ارائه شده به صورت متوسط دو بار تکرار می باشد.

¹ - Herschel Bulkly

² - Casson

یافته ها

- محاسبه تنش برشی و نرخ کرنش

با توجه به اینکه دستگاه ویسکومتر بروکفیلد با استفاده از اسپیندل های دیسکی قادر به محاسبه تنش برشی و نرخ کرنش نمی باشد لذا کمیت های قابل اندازه گیری در این دستگاه که به صورت تعداد دور بر دقیقه، ویسکوزیته ظاهری و درصد گشتاور می باشد، باید به کمیت های نرخ کرنش و تنش برشی تبدیل گردد تا بتوان از آنها در محاسبات استفاده کرد. بنابراین از روش زیر *Mitschka*, (1982; Briggs & Steffe, 1997) برای بدست آوردن نرخ کرنش و تنش برشی از کمیت های دور بر دقیقه و درصد گشتاور استفاده شد. که در این مقاله مقادیر نرخ کرنش و تنش برشی بدست آمده با استفاده از این روش می باشد.

قدم اول یافتن شاخص رفتاری جریان (n) می باشد که از معادله زیر بدست می آید:

$$M = (\text{constant}) N^n \quad (1)$$

یا به صورت فرم لگاریتمی:

$$\ln M = \ln(\text{constant}) + n \ln(N) \quad (2)$$

قدم دوم محاسبه تنش برشی توسط رابطه زیر می باشد.

$$\sigma = k_\sigma (C)(M) \quad (3)$$

که مقدار k_σ طبق جدول ۱ با شماره اسپیندل تغییر می یابد. و مقدار C به مقدار گشتاور کل قابل اندازه گیری ویسکومتر بستگی دارد (جدول ۲).

جدول ۱- مقادیر k_σ برای اسپیندهای Brookfield

شماره اسپیندل	k_σ (Pa)
۱	۰/۰۳۵
۲	۰/۰۱۱۹
۳	۰/۲۷۹
۴	۰/۵۳۹
۵	۱/۰۵
۶	۲/۳۵
۷	۸/۴۰

جدول ۲- مقادیر C برای ویسکومترهای Brookfield

مدل ویسکومتر	C (بدون بعد)
$\frac{1}{2} RV$	۰/۵
RV	۱
HAT	۲
HBT	۸

قدم سوم محاسبه نرخ کرنش متوسط می باشد که توسط رابطه زیر بدست می آید.

$$\dot{\gamma}_a = k_\dot{\gamma} (N) \quad (4)$$

که $k_\dot{\gamma}$ بستگی به مقدار عددی n محاسبه شده دارد و از رابطه زیر بدست می آید.

$$k_\dot{\gamma} = 0/۲۶۳ \left(\frac{1}{n} \right)^{0/۷۷۱} \quad (5)$$

- رفتار تیکسوتروپیک (رقیق شونده با زمان)

طبق تعریف تیکسوتروپیک، موادی که دارای این ویژگی می باشند بعد از اعمال نرخ کرنش، ویسکوزیته ظاهری آنها با گذشت زمان روند کاهشی پیدا می کند تا به یک مقدار ثابت برسد و با گذشت زمان تغییر نکند (نمودار ۱). لذا برای مدل کردن این رفتار، نمونه مورد نظر تحت چهار نرخ کرنش مختلف قرار گرفت و زمان اعمال هر نرخ کرنش ۶۰ دقیقه انتخاب شد که در این مدت زمان نمونه مورد آزمایش کاملاً رفتار تیکسوتروپیک را از خود نشان داده و مقدار ویسکوزیته آن به مقدار ثابتی می رسد. سپس با استفاده از روابط و توضیحات ارائه شده در قسمت بررسی رفتار تیکسوتروپیک، مدل ریاضی این رفتار مشخص شد.

- رفتار ویسکوالاستیک

برای بدست آوردن پارامترهای ویسکوالاستیک از دو آزمایش به شرح زیر استفاده شد.

- آزمایش فرارفت تنش برشی

ماده ای که دارای خاصیت ویسکوالاستیک می باشد در هنگام اعمال نرخ کرنش که قبلاً در حالت آرمیدگی به سر می برد، فرارفت اولیه ای را در مقدار تنش برشی قبل از رسیدن به حالت یکنواخت نشان می دهد (Steffe, 1996). بنابراین از معادله ارائه شده توسط *Leider & Bird* (1996) (Steffe, 1996) برای مدل کردن رفتار ویسکوالاستیک نمونه مورد نظر استفاده شد. به این منظور نمونه مورد نظر تحت نرخ کرنش ثابت قرار داده شد و

استفاده از معادله پاورلا و اطلاعات جدول ۳ و نتایج حاصل از رگرسیون خطی مقادیر K, n به صورت زیر مشخص می‌گردد.

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n \quad (۶)$$

یا

$$\ln \sigma = \ln K + n \ln(\dot{\gamma}) \quad (۷)$$

بعد از رگرسیون خطی:

$$n = 0.164$$

$$K = 54.73 \text{ pa.s}^{0.164}$$

- بررسی رفتار تیکسوتروپیک (رقیق شونده با زمان)

با توجه به آزمایشات انجام شده در یک نرخ کرنش ثابت (نمودار ۱) مشاهده شد که ویسکوزیته ظاهری با گذشت زمان کاهش می‌یابد که دلیل بر رفتار تیکسوتروپیک رب گوجه فرنگی می‌باشد.

برای مدل کردن رفتار وابسته به زمان با توجه به اصل super position با اعمال پارامتر ساختاری (λ_1) بر مدل رفتار مستقل از زمان که به صورت رفتار سیال پاورلا می‌باشد (Tiu & Boger, 1974) می‌توان خواص وابسته به زمان نمونه مورد نظر را مورد بررسی قرار داد.

$$\sigma = \lambda_1 (K(\dot{\gamma})^n) \quad (۸)$$

که λ_1 تابعیت زمانی دارد و می‌توان نرخ کاهش آن را با معادله درجه دو تخمین زد.

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = -k(\lambda_1 - \lambda_e) \quad (۹)$$

که در اینجا k_1 یک ثابت بوده و تابع نرخ کرنش می‌باشد لذا با تبدیل معادله (۷) به فرم زیر و با توجه به اینکه داریم:

$$\lambda_1 = \frac{\sigma}{K(\dot{\gamma})^n} = \frac{\eta \dot{\gamma}}{K(\dot{\gamma})^n} \quad (۱۰)$$

داده های ویسکوزیته ظاهری طی ۲ ثانیه اول که مقدار ماکزیمم را تجربه کرده (نمودار ۲)، ثبت شد سپس با استفاده از روابط و توضیحات ارائه شده در قسمت آزمایش فرارفت تنش برشی بخش نتایج و بحث مدل ریاضی این رفتار مشخص گردید.

- آزمایش کرنش پله‌ای

ماده ای که دارای خاصیت ویسکوالاستیک باشد بعد از حذف نرخ کرنش که قبلا تحت نرخ کرنش ثابت بوده، مقدار تنش برشی حاصل از حذف نرخ کرنش به تدریج به مقدار یکنواخت کاهش پیدا می‌کند (Steffe, 1996). جهت انجام این آزمایش نمونه مورد نظر را که به مدت یک ساعت تحت نرخ کرنش ثابت بوده با حذف نرخ کرنش، داده های درصد گشتاور توسط نرم افزار Rheocalc (ارائه شده توسط Brookfield Engineering Lab) که قابلیت ثبت درصد گشتاور در لحظه حذف نرخ کرنش را دارا می‌باشد، ثبت گردید. داده های حاصل از انجام این آزمایش (نمودار ۳) نشان دهنده خاصیت ویسکوالاستیکی رب گوجه فرنگی مورد آزمایش می‌باشد سپس با استفاده از معادله ارائه شده توسط Peleg & Normand (Steffe, 1996) و توضیحات و محاسبات ارائه شده در قسمت آزمایش کرنش پله ای بخش نتایج و بحث این رفتار به صورت ریاضی مدل شد.

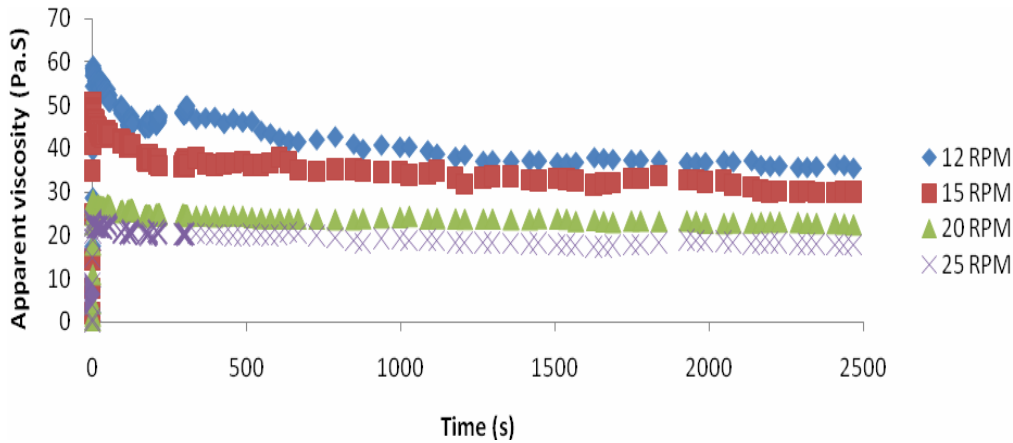
بحث

- تعیین پارامترهای K, n معادله پاورلا

پارامترهای K, n معادله پاورلا مربوط به قسمت مستقل از زمان می‌باشد. که برای بدست آوردن این مقادیر نمونه مورد نظر تحت پنج نرخ کرنش متفاوت قرار گرفت و مقادیر تنش متوسط توسط دستگاه ویسکومتر در زمان قبل از کاهش تنش برشی طبق جدول ۳ بدست آمد.

جدول ۳- مقادیر تنش برشی در نرخ کرنش های مختلف

تنش برشی (pa)	نرخ کرنش (1/s)
$80/81 \pm 1$	۱۱/۳
$84/34 \pm 1/61$	۱۴/۱۳
$90 \pm 1/55$	۱۸/۸۴
$91/53 \pm 1/45$	۲۳/۵۳
$93/62 \pm 1/86$	۲۸/۵۷



نمودار ۱- ویسکوزیته ظاهری در نرخ کرنش‌های مختلف

که در یک نرخ کرنش ثابت خواهیم داشت:

$$\frac{d\lambda_t}{dt} = \frac{d\eta}{dt} \left(\frac{(\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \right) \quad (11)$$

که یک معادله خطی با شیب a_1 می‌باشد. در جدول ۴ می‌توان مقادیر a_1 در نرخ کرنش‌های مختلف را بدست آورد.

جدول ۴- پارامترهای معادله خطی (۱۷) در نرخ کرنش‌های مختلف

نرخ کرنش (sec^{-1})	a_1	$1/(\eta_0 - \eta_e)$
۱۱/۷۳	1×10^{-7}	3×10^{-5}
۱۴/۶۷	2×10^{-7}	5×10^{-5}
۱۹/۵۶	4×10^{-7}	0.0002
۲۴/۴۵	1×10^{-6}	0.0001
۲۹/۳۴	$1/71 \times 10^{-6}$	0.0002

و در نتیجه:

$$-k_1 (\lambda_t - \lambda_e)^r = \frac{d\eta}{dt} \left(\frac{(\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \right) \quad (12)$$

با جایگذاری معادله (۹) در معادله فوق خواهیم داشت:

$$-k_1 \left(\left(\frac{\eta(\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \right) - \left(\frac{\eta_e(\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \right) \right)^r = \frac{d\eta}{dt} \left(\frac{(\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \right) \quad (13)$$

با استفاده از معادله (۱۶) می‌توان مقدار k_1 را از روی a_1 بدست آورد. جدول ۵ مقادیر k_1 را در نرخ کرنش‌های مختلف بیان می‌کند.

جدول ۵- مقادیر k_1 در نرخ کرنش‌های مختلف

نرخ کرنش (sec^{-1})	a_1	K_1
۱۱/۷۳	1×10^{-7}	$1/2 \times 10^{-6}$
۱۴/۶۷	2×10^{-7}	$1/99 \times 10^{-6}$
۱۹/۵۶	4×10^{-7}	$3/15 \times 10^{-6}$
۲۴/۴۵	1×10^{-6}	$6/57 \times 10^{-6}$
۲۹/۳۴	$1/71 \times 10^{-6}$	$9/68 \times 10^{-6}$

با ساده سازی معادله فوق:

$$\frac{d\eta}{dt} = -a_1 = (\eta - \eta_e)^r \quad (14)$$

که

$$a_1 = \frac{k_1 (\dot{\gamma})^{1-n}}{K} \quad (15)$$

در نتیجه با استفاده از معادله (۱۴):

$$k_1 = a_1 K (\dot{\gamma})^{1-n} \quad (16)$$

با انتگرال گیری از معادله (۱۳) داریم:

$$\int_{\eta_e}^{\eta} (\eta - \eta_e)^{-r} d\eta = \int_0^t -a_1 dt \quad (17)$$

که نتیجه انتگرال به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{\eta - \eta_e} = \frac{1}{\eta_0 - \eta_e} + a_1 t \quad (18)$$

لذا می‌توان از جدول فوق نتیجه گرفت که تابعیت k_1 از $\dot{\gamma}$ به صورت زیر می‌باشد

$$k_1 = 3 \times 10^{-7} \exp(0.1118 \dot{\gamma}) \quad (19)$$

که در نتیجه می‌توان مقدار λ_t را از رابطه‌های (۱۰) و (۱۸) به صورت زیر محاسبه کرد.

گرفتن K', n' پارامترهای معادله پاورلا در لحظه قرار گرفتن ماده در تنش ماکزیمم به هنگام اعمال نرخ کرنش و K, n مربوط به لحظه قبل از شروع به کاهش تنش برشی به هنگام اعمال نرخ کرنش می باشد لذا مقادیر K, n با توجه به جدول ۶ و K', n' با توجه به جدول ۷ و طبق روش ارائه شده در قسمت محاسبه تنش برشی و نرخ کرنش بخش مواد و روشها به صورت زیر می باشد:

$$K' = 51 / 0.7 \quad K = 54 / 73$$

$$n' = 0 / 1.91 \quad n = 0 / 1.64$$

جدول ۶- مقادیر تنش و نرخ کرنش در لحظه قبل از شروع به کاهش تنش برشی

تنش برشی (Pa)	نرخ کرنش (sec^{-1})
$80/81 \pm 1$	11/3
$84/34 \pm 1/61$	14/13
$91/0.3 \pm 1/45$	18/84
$91/65 \pm 1/62$	23/56
$93/62 \pm 1/86$	28/27

جدول ۷- مقادیر تنش و نرخ کرنش در ماکزیمم مقدار تنش برشی

تنش برشی (Pa)	نرخ کرنش (sec^{-1})
$80/6 \pm 1/55$	11/3
$88/57 \pm 1/51$	11/89
$89/27 \pm 1/79$	15/85
94 ± 1	19/82
$98/7 \pm 1/13$	23/78

$$\lambda_t = \frac{1}{K(\dot{\gamma})^{n-1}} \left(\left(\frac{1}{\eta_0 - \eta_e} + \frac{K(\dot{\gamma})^{n-1}}{K} (t) \right)^{-1} + \eta_e \right) \quad (20)$$

که می توان مقدار $\frac{1}{\eta_0 - \eta_e}$ را از جدول ۴ و مقدار K_1 را از رابطه (۱۹) بدست آورد. در رابطه فوق نیاز به مقادیر K, n (پارامترهای معادله پاورلا) می باشد که در قسمت قبل بدست آمد.

بررسی رفتار ویسکوالاستیک

آزمایش فرارفت تنش برشی

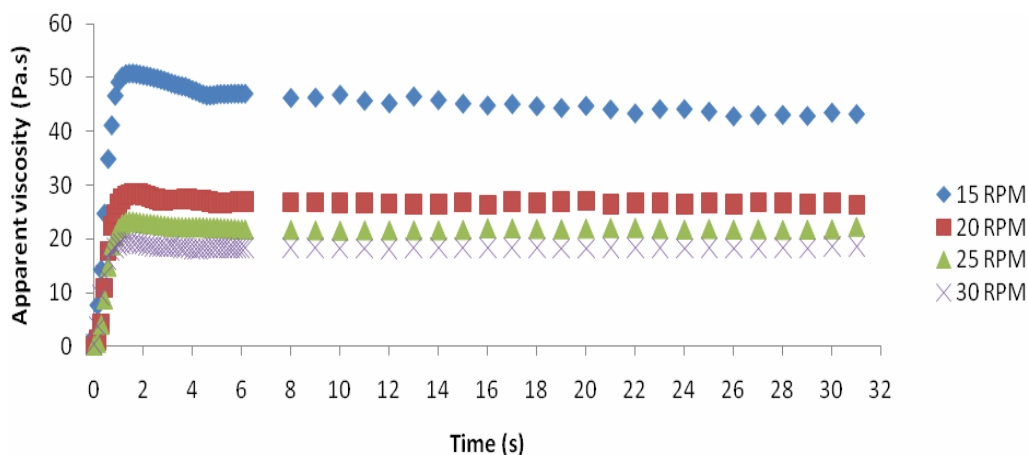
وقتی که نمونه آزمایش در حالت آرمیدگی می باشد با اعمال ناگهانی نرخ کرنش، مقدار تنش برشی یا متناظراً ویسکوزیته ظاهری فرا رفتی از خود نشان داده و سپس به مقدار ثابت می رسد که حاکی از ویسکوالاستیک بودن رب گوجه فرنگی است (نمودار ۲).

برای بیان کردن این رفتار به صورت ریاضی از معادله **Leider & Bird (Steffe, 1996)** استفاده شد.

$$\sigma_{v1}^+ = K(\dot{\gamma})^n \left[1 + (b\dot{\gamma}t - 1) \exp\left(\frac{-t}{an\lambda_v}\right) \right] \quad (21)$$

که

$$\lambda_v = \left(\frac{K'}{rK} \right)^{1/(n'-n)} \quad (22)$$



نمودار ۲- ویسکوزیته ظاهری در نرخ کرنشهای مختلف در لحظات اولیه اعمال نرخ کرنش

در نرخ کرنش ثابت با گذشت زمان و رفتار ویسکوالاستیک آن باعث فرارفتی در مقدار تنش برشی در لحظات اولیه اعمال نرخ کرنش و کاهش تدریجی مقدار تنش برشی در لحظه حذف نرخ کرنش می گردد. که پارامتر ساختاری رفتار تیکسوتروپیک طبق معادله زیر بیان گردید.

$$\lambda_t = \frac{1}{K(\dot{\gamma})^{n-1}} \left(\left(\frac{1}{\eta_0 - \eta_e} + \frac{K(\dot{\gamma})^{n-1}}{K} (t) \right)^{-1} + \eta_e \right)$$

$$k_1 = 3 \times 10^{-7} \exp(0.118\dot{\gamma})$$

$$K = 54/73$$

$$n = 0.164$$

و رفتار ویسکوالاستیک آن در لحظات اولیه اعمال نرخ کرنش طبق رابطه زیر بیان گردید.

$$\sigma_{\gamma}^+ = f(\dot{\gamma}, t) = K(\dot{\gamma})^n \left(1 + (b\dot{\gamma}t - 1) \exp\left(\frac{-t}{an\lambda_v}\right) \right)$$

$$\lambda_v = 5/46 \times 10^{-13}$$

$$a = 4/119692974 \times 10^{12}$$

$$b = 1$$

$$K = 54/73$$

$$n = 0.164$$

و در لحظه حذف نرخ کرنش رفتار آن از رابطه زیر پیروی می کند.

$$\frac{\sigma_e t}{\sigma - \sigma_e} = k_1 + k_2 t$$

$$k_1 = 20/16 \text{ sec}$$

$$k_2 = 1/393$$

که در این صورت

$$\lambda_v = \left(\frac{51/07}{2 \times 54/73} \right)^{1/(0.191-0.164)} = 5/46 \times 10^{-13}$$

با داشتن مقدار λ_v و حل معادله (20) در دو زمان متفاوت قبل از رسیدن به ماکزیمم تنش برشی مقادیر a, b به صورت زیر بدست می آیند.

$$a = 4/119692974 \times 10^{12}$$

$$b = 1$$

- آزمایش کرنش پله ای

در این قسمت نمونه مورد آزمایش تحت نرخ کرنش ثابت قرار می گیرد تا به تنش ثابتی برسد در این لحظه با حذف نرخ کرنش طبق نمودار 3 مشاهده می گردد مقدار تنش به تدریج به یک مقدار نهایی نزدیک می گردد که این رفتار حاکی از ویسکوالاستیک بودن نمونه مورد آزمایش می باشد.

برای بیان این رفتار به صورت ریاضی از معادله Peleg & Normand (Steffe, 1996) به صورت زیر استفاده شد.

$$\frac{\sigma_e t}{\sigma - \sigma_e} = k_1 + k_2 t \quad (23)$$

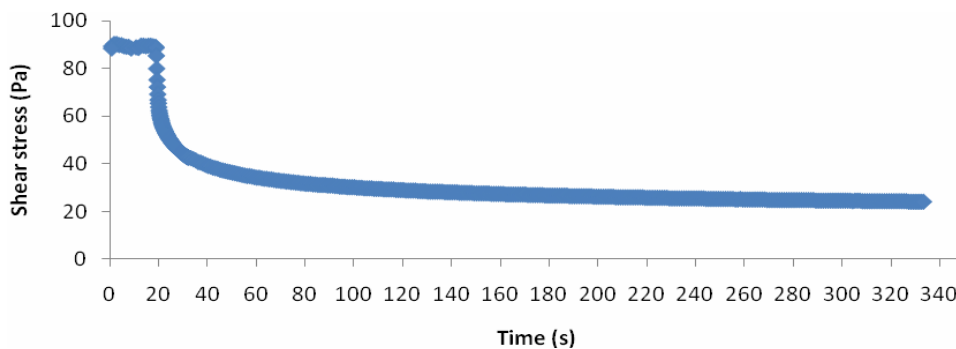
که با استفاده از اطلاعات نمودار 3 و رگرسیون خطی می توان مقادیر k_1, k_2 را به صورت زیر ارائه کرد.

$$k_1 = 20/16 \text{ sec}$$

$$k_2 = 1/393$$

نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده، رب گوجه فرنگی رفتار ویسکوالاستیک و تیکسو تروپیک را از خود نشان داد که رفتار تیکسوتروپیک آن باعث کاهش ویسکوزیته ظاهری



نمودار 3- تنش برشی در مقابل زمان، هنگام حذف نرخ کرنش

فهرست علائم و اختصارات					
σ_{r1}^+	تابع رشد تنش برشی، Pa	n	شاخص رفتاری جریان	$\dot{\gamma}$	نرخ کرنش، sec^{-1}
λ_v	ثابت زمانی معادله برد- لیدر	t	زمان، sec	σ	تنش برشی، Pa
$k_{\dot{\gamma}}$	ضریب تبدیل نرخ کرنش	η	ویسکوزیته ظاهری، Pa.s	σ_e	تنش برشی اولیه، Pa
k_{σ}	ضریب تبدیل تنش برشی، pa	η_e	ویسکوزیته ظاهری تعادلی، Pa.s	λ_t	پارامتر ساختاری
C	ثابت بدون بعد	K	ضریب سازگاری، Pa.s ⁿ	λ_e	پارامتر ساختار تعادلی
		M	درصد گشتاور	N	سرعت چرخش اسپیندل، دور بر دقیقه

منابع

- Barbara, C. & El-Omri, A. (2009). Viscometric behavior of reconstituted tomato concentrate. *J. Food bioprocess technol.*
- Bayod, E., Mansson, P., Innings, F., Bergenstahl, B. & Tornberg, E. (2007). Low shear rheology of concentrated tomato products. Effect of particle size. *J. Food biophysics*, 2, 146-157.
- Briggs, J. L. & Steffe, J. F. (1997). Using brookfield data and Mitschka method to evaluate power law foods. *J. Text. Stud.*, 28, 517-522.
- De kee, D., Code, R. K. & Turcotte, G. (1983). Flow properties of time-dependent food stuff. *J. Rheol.*, 27, 581-604.
- Hayes, W. A., Smith, P. G. & Morris, A. E. J. (1998). The production and quality of tomato concentrates. *Critical review food science nutrition*, 38, 537-564.
- Mitschka, P. (1982). Simple conversion of brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *J. Rheol. Acta.*, 21, 207-209.
- Sanchez, M. C., Valencia, C., Ciruelos, A., Latorre, A. & Gallegos, C. (2003). Rheological properties of tomato paste: Influence of the addition of tomato slurry. *J. Food Sci.*, 68, 551-554.
- Sharma, S. K., Lemaguer, M., Liptay, A. & Poysa, V. (1996). Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. *Food research Int.*, 29, 175-179.
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering* (2nd ed., pp. 294-312). Michigan state university: Freeman press.
- Tiu, C. & Boger, D. V. (1974). Complete rheological characterization of time-dependent food products. *J. Text. Stud.*, 5, 329-338.
- Valencia, C., Sanchez, M. C., Ciruelos, A., Lattore, A., Madiedo, J. M. & Gallegos, C. (2003). Non-linear viscoelasticity modeling of tomato paste products. *Food research Int.*, 36, 911-919.
- Xu, S., Shoemaker, C. F. & Lun, B. S. (1986). Effect of break temperature on rheological properties and microstructure of tomato juice and paste. *J. Food Sci.*, 51, 399-402.

Viscoelastic and Time Dependant Behavior of Tomato Paste

A. Heidarinasab^{a*}, V. Moghaddam Nansa^b

^a Associate Professor of the College of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

^b M. Sc. Student of Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: 18 October 2009

Accepted: 10 February 2010

Abstract

Introduction: This paper is concerned with rheological behavior of tomato paste from the view point of viscoelasticity and time dependant properties in order to design various units of tomato paste production line.

Materials and Methods: Rheological behavior of tomato paste is determined at Spindle Brookfield viscometer

Results: Experiments were carried out and determined that time dependant category of the samples show thixotropic behavior. Both stress overshoot and step strain tests emphasized the viscoelastic property of the sample, therefore the appropriate model were obtained to define the viscoelastic and time dependent behavior.

Conclusion: This work exhibited one model which consisted of time dependent and viscoelastic rheological behavior of tomato paste. The results of the model are compared with experimental data which indicated good correlations between model result and experimental data. The experimental results showed that tomato paste behaves as a non-Newtonian semi-fluid which follows power law model.

Keyword: Rheology, Thixotropic, Tomato paste, Viscoelastic.

* Corresponding Authors: a.heidarinasab@yahoo.com