مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1395، دوره 16، شماره 3، ص‌ص 342-352

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی تبخیر قطره بیودیزل؛ تاثیر شرایط کاری و ترکیب سوخت

رسول شاهسون مارکده[1]، حجت قاسمی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، h_ghassemi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آذر 1394

پذیرش: 29 بهمن 1394

ارائه در سایت: 07 فروردین 1395

کلید واژگان:

مدل‌سازی

تبخیر

قطره

بیودیزل

فشار زیاد

چکیده

در این مقاله تبخیر قطره بیودیزل تحت شرایط کاری مختلف به صورت عددی مطالعه شده است. مدلی رایج برای تبخیر قطره سوخت‌های چندجزئی استفاده گردیده است. در این مدل معادلات شبه‌پایای فاز گاز به شکل تحلیلی و معادلات انرژی و انتقال گونه‌های شیمیایی فاز مایع به صورت عددی حل شده‌اند. زیرمدل‌ها برای در نظر گرفتن اثر فشارهای زیاد اصلاح شده است. معادله حالت گاز واقعی پنگ-رابینسون به‌کار گرفته شده و تعادل فاز با به کارگیری فوگاسیتی محاسبه شده است. هم‌چنین اثر فشار بر خواص ترموفیزیکی و انتقالی فاز گاز در نظر گرفته شده است. پنج بیودیزل متداول که ترکیب‌های متفاوتی از متیل استرها می‌باشند، بررسی شده‌اند. مشاهده شده است که تغییر در ترکیب بیودیزل تفاوت زیادی در عمر قطره ایجاد نمی‌کند و بیشترین تفاوت نزدیک به 20% می‌باشد. افزایش دمای محیط به کاهش عمر قطره و شدیدتر شدن گرادیان دمای درون قطره منجر می‌گردد. تاثیر فشار محیط بر تبخیر قطره در دماهای مختلف متفاوت می‌باشد. در دماهای کم، افزایش فشار به افزایش عمر قطره می‌انجامد. در حالی که در دماهای زیاد، افزایش فشار ابتدا باعث بیشتر شدن عمر قطره و سپس کاهش آن می‌گردد. افزایش سرعت اولیه پاشش قطره نیز عمر قطره را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که در فشارهای زیاد، دمای قطره به دمای بحرانی نزدیک شده و دقت مدل با تقریب فاز گاز شبه‌پایا کاهش می‌یابد. شعاع تاثیر بخار سوخت بر محیط با افزایش دما بزرگ‌تر و با افزایش فشار کوچک‌تر می‌گردد.

Modeling of biodiesel droplet evaporation: effects of operating conditions and fuel composition

Rasoul Shahsavan Markadeh, Hojat Ghassemi*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, h_ghassemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 December 2015
Accepted 18 February 2016
Available Online 26 March 2016

Keywords:
Modeling
Evaporation
Droplet
Biodiesel
High pressure

ABSTRACT

In this study evaporation of biodiesel droplet under different operating conditions is investigated. The model is a common droplet vaporization model for multicomponent fuels. In this model, gas phase quasi-steady equations are solved analytically and energy and species transport equations in liquid phase are solved numerically. The sub-models are modified to consider high pressure effects. Peng-Robinson equation of state is used for gas phase and phase equilibrium is determined using fugacity. Effects of pressure on the thermophysical and transport properties of gas phase are considered. Five biodiesels with different composition are studied. These biodiesels have different composition of methyl esters. Biodiesel composition shows little effect on droplet lifetime and maximum difference is about 20%. It is observed that increasing ambient temperature leads to decrease in droplet lifetime and increases temperature gradient inside droplet. Ambient pressure has different effects on droplet vaporization behavior at different ambient temperature. At lower temperature environment, increasing pressure increases the droplet lifetime while at higher temperatures droplet lifetime first increases and then decreases with pressure. Increasing initial velocity of droplet reduces the droplet lifetime. Results show that at high pressures, droplet temperature reach to values near to critical temperature and accuracy of quasi-steady approximation decreases. Radius of vapor influenced sphere increases with temperature and decreases with pressure.

1- مقدمه

بیودیزل به دلیل افزایش نگرانی‌ها پیرامون آلاینده‌ها و گرمایش زمین و هم‌چنین تقاضا برای منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار مورد توجه بسیار قرار گرفته است [1]. بیودیزل استرهای مونوآلکیلی هستند که از ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌های حیوانی یا گیاهی با یک الکل به دست می‌آیند [2]. این فرآوری روغن‌های حیوانی و گیاهی منجر به تولید سوختی می‌شود که می‌توان آن را در موتورهای دیزل بدون ایجاد تغییرات اساسی استفاده نمود [3]. به‌کارگیری بیودیزل در موتور منجر به کاهش آلاینده‌های خروجی، به جز اکسید نیتروژن، می‌گردد [4]، با این وجود هزینه بالاتر تولید بیودیزل نسبت به دیزل مانعی بر سر راه افزایش کاربرد آن می‌باشد [5]، هر چند نشان داده شده است استفاده از ترکیب بیودیزل و دیزل می‌تواند صرفه اقتصادی داشته باشد [6].

سوخت تزریق شده به درون سیلندر با جذب حرارت از هوای گرم و پرفشار تبخیر می‌گردد. این فرایند منجر به کاهش کوچکی در فشار سیلندر

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
R. Shahsavan Markadeh, H. Ghassemi, Modeling of biodiesel droplet evaporation: effects of operating conditions and fuel composition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 342-352, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

می‌شود و سپس به دلیل واکنش‌های گرمازای احتراق فشار سیلندر افزایش سریعی خواهد داشت. از این رو اشتعال سوخت تحت تاثیر فرایندهای فیزیکی مانند اسپری، اتمیزاسیون و تبخیر و فرایندهای شیمیایی می‌باشد. زمان تاخیر اشتعال تاثیر زیادی بر فرایند احتراق، به ویژه در مراحل ابتدایی دارد. زمان تاخیر اشتعال تابعی از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است که سوخت طی می‌کند [7].

تبخیر قطره سوخت، به‌دلیل اهمیت در کاربردهای فراوان مانند موتورهای دیزل، موضوع مطالعات بسیاری بوده است. مطالعاتی نیز بر روی تبخیر قطرات بیودیزل انجام گرفته است. ساها و همکاران [8] با استفاده از مدل عددی به بررسی تبخیر قطره بیودیزل و مخلوط بیودیزل و دیزل پرداخته‌اند. ایشان دیزل را با تترادکان ($C_{14}H_{30}$) و بیودیزل را با متیل اولیت ($C_{19}H_{38}O_2$) مدل کرده و نتیجه گرفته‌اند افزودن بیودیزل به دیزل منجر به افزایش طول عمر قطره می‌گردد. القبیسی و همکاران [9] نشان داده‌اند که با در نظر گرفتن بیودیزل به صورت تک‌جزئی در محاسبات خطا وارد خواهد کرد. ساژین و همکاران [10] با ارائه‌ی حلی تحلیلی برای معادلات حاکم درون قطره تبخیر پنج نوع بیودیزل را مطالعه کرده‌اند و نتیجه گرفته‌اند چندجزئی در نظر گرفتن سوخت به عمر بیشتر و دمای سطح زیادتر برای قطره می‌انجامد. القبیسی و همکاران [11] مدل ارائه شده در [10] را برای مطالعه بیودیزل‌های مختلفی به کار برده و رفتار آن‌ها را با هم مقایسه نموده‌اند.

هر چند در مدل‌های فوق شرایط کاری موتور دیزل، فشار و دمای زیاد، در نظر گرفته شده است، اما زیرمدل‌ها و خواص استفاده شده در این مطالعات در فشارهای زیاد از اعتبار کمی برخوردارند. از این رو در این مقاله تاثیر فشار بر خواص ترموفیزیکی و انتقال فاز گاز با استفاده از روابط موجود در نظر گرفته شده است. هم‌چنین با در نظر گرفتن معادله حالت گاز کامل، قوانین تعادل فاز بر پایه فوگاسیتی برای فشارهای زیاد به‌کار برده شده‌اند. مدل تبخیر قطره بیودیزل در محیط با جابجایی تعمیم مدل ارائه شده توسط آبرامزون و سیریگنانو [12] برای قطره چندجزئی است. این مدل بر پایه حل تحلیلی معادلات فاز گاز و حل عددی معادلات فاز مایع می‌باشد. پس از سنجش اعتبار مدل با داده‌های تجربی، تبخیر قطره بیودیزل‌های مختلف بررسی خواهد شد.

2- مواد و روش

در این بخش ابتدا اجزای مدل و روند حل مساله توضیح داده خواهد شد. سپس به معرفی بیودیزل، ترکیب و ساختار آن و نحوه محاسبه خواص ترموفیزیکی و انتقال آن پرداخته خواهد شد.

2-1- مدل

مدل حاضر در واقع تعمیم مدل آبرامزون و سیریگنانو [12] برای قطره چندجزئی است که توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. قطره سوخت با دمای اولیه T_{l0} و ترکیب Y_{l0} با سرعت U_{l0} در محیطی ساکن با دمای T_∞، فشار P_∞ و ترکیب $Y_{g\infty}$ تبخیر می‌شود. فرض تقارن کروی که در اعداد رینولدز کم و متوسط ($Re\leq100$) برقرار است باعث کاهش ابعاد مساله به یک بعد می‌شود. این مدل را می‌توان شامل سه مرحله دانست [13]: محاسبات انتقال جرم و حرارت فاز گاز، محاسبات انتقال جرم و حرارت فاز مایع، محاسبات دینامیک حرکت قطره. در ادامه هر کدام از این مراحل تشریح می‌شوند.

2-1-1- فاز گاز

در محاسبات فاز گاز نرخ تبخیر، $\dot{m}$، و حرارت نفوذ کرده از فاز گاز به درون قطره که صرف گرمایش قطره می‌گردد، Q_L، محاسبه می‌شوند.

$$\dot{m} = 2\pi\rho_g D_g r_s \mathrm{Sh}^* \ln(1 + B_M) \tag{1}$$

$$Q_L = \dot{m}\left[\frac{\left(c_{pg}(T_\infty - T_s)\right)}{B_T} - L_{\mathrm{tot}}\right] \tag{2}$$

که ρ_g، D_g و c_{pg} به ترتیب چگالی، ضریب دیفیوژن و ظرفیت حرارتی ویژه فاز گاز می‌باشند. r_s و T_s شعاع قطره و دمای سطح قطره می‌باشند. $L_{\mathrm{tot}} = \dot{m}_i L_i / \dot{m}$ گرمای نهان تبخیر کل می‌باشد که در آن $\dot{m}_i$ و L_i به ترتیب نرخ تبخیر و گرمای نهان تبخیر جزء i می‌باشند. B_M عدد انتقال جرم اسپالدینگ می‌باشد که طبق رابطه 3، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_M = \frac{\sum_i (Y_{i,F,s} - Y_{i,F,\infty})}{1 - \sum_i Y_{i,F,s}} \tag{3}$$

که $Y_{i,F,s}$ و $Y_{i,F,\infty}$ به ترتیب کسر جرمی بخار سوخت در فاز گاز در سطح قطره و در محیط می‌باشند. Sh^* عدد شروود اصلاح شده است که اثر جریان دمشی ناشی از تبخیر را نیز در نظر می‌گیرد و به صورت زیر با عدد شروود استاندارد برای کره رابطه دارد:

$$\mathrm{Sh}^* = 2 + \frac{(\mathrm{Sh}_0 - 2)}{F_M} \tag{4}$$

که فاکتور اصلاح F_M برحسب عدد انتقال جرم محاسبه می‌گردد:

$$F = (1 + B)^{0.7}\frac{\ln(1 + B)}{B} \tag{5}$$

B_T عدد انتقال حرارت اسپالدینگ می‌باشد و برای حالتی که عدد لوئیس فاز گاز واحد فرض شود با عدد انتقال جرم برابر خواهد بود. از آن‌جایی که فرض عدد لوییس واحد فاز گاز در تعیین رفتار تبخیر قطرات سوخت مناسب نمی‌باشد [14]، با فرض عدد لوئیس غیر واحد رابطه‌ی زیر بین دو عدد انتقال برقرار است:

$$B_T = (1 + B_M)^{\emptyset} - 1 \tag{6}$$

که پارامتر $\emptyset$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\emptyset = \frac{c_{pF}}{c_{pg}}\frac{\mathrm{Sh}^*}{\mathrm{Nu}^*}\frac{1}{\mathrm{Le}} \tag{7}$$

که در آن Nu^* عدد ناسلت اصلاح شده است و از عدد ناسلت استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathrm{Nu}^* = 2 + \frac{(\mathrm{Nu}_0 - 2)}{F_T} \tag{8}$$

که در آن فاکتور اصلاح F_T با استفاده از رابطه (5) و B_T تعیین می‌گردد. به منظور تعیین کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره در فاز گاز از فرض تعادل استفاده می‌گردد. در صورتی که فشار کم باشد، رفتار گاز و مخلوط مایع را می‌توان ایده‌آل در نظر گرفت و در نتیجه تعادل فاز از قانون رولت پیروی می‌کند. این قانون بیان می‌کند که بخار سوخت در مجاورت قطره در حالت اشباع قرار دارد و از این رو می‌توان کسر مولی هر جزء را از فشار اشباع آن در دمای سطح قطره تعیین نمود:

$$x_{i,F,s} = x_{i,l,s}\frac{P_{i,\mathrm{sat}}}{P_\infty} \tag{9}$$

که در آن $P_{i,\mathrm{sat}}$ فشار اشباع جزء i، P_∞ فشار محیط و x کسر مولی می‌باشند. در فشارهای زیاد رفتار مخلوط مایع از حالت ایده‌آل فاصله گرفته و در نتیجه استفاده از رابطه فوق مناسب نمی‌باشد. در این حالت از مفهوم فوگاسیتی استفاده می‌شود. هنگامی که دو فاز در تعادل باشند فوگاسیتی آن‌ها با هم برابر است. بنابراین برای محاسبات تعادل در سطح قطره فوگاسیتی هر جزء در دو فاز با هم برابر فرض می‌شود:

$$x_{i,g}\varphi_{i,g} = x_{i,l}\varphi_{i,l} \tag{10}$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

ضریب فوگاسیتی نیز با در نظر گرفتن یک معادله حالت قابل محاسبه است و در این مطالعه از معادله حالت پنگ-رابینسون استفاده شده است. با این معادله حالت ضریب فوگاسیتی به صورت رابطه (11) محاسبه می‌شود [15]:

$$\ln\varphi_i = \frac{B_i}{B}(Z-1) - \ln(Z-B) + \frac{A}{2\sqrt{2}B}\left[\frac{B_i}{B} - \frac{2}{A}\sum_{j=1}^{N} x_j A_{ij}\right]\ln\left[\frac{Z+(2+\sqrt{2})B}{Z+(2-\sqrt{2})B}\right] \quad (11)$$

که در آن

$$A_i = 0.4572\frac{\alpha_i P_{i,r}}{T_{i,r}^2} \quad (12)$$

$$B_i = 0.0778\frac{P_{i,r}}{T_{i,r}} \quad (13)$$

$$\alpha_i = \left[1 + (0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2) \times (1 - T_{i,r}^{1/2})\right]^2 \quad (14)$$

پارامترهای A و B برای مخلوط با قاعده اختلاط ون‌دروالس محاسبه می‌شود:

$$A = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_i x_j (1-k_{ij})\sqrt{A_i A_j} \quad (15)$$

$$B = \sum_{i=1}^{N} x_i B_i \quad (16)$$

در معادلات فوق ω_i ضریب خارج از مرکزی و $A_{ij} = \sqrt{A_i A_j}$ می‌باشند. k_{ij} ضریب اندرکنش دوتایی است که برای برخی از مواد به صورت تجربی ارائه شده است. در صورت نبود داده‌های تجربی این ضریب برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. Z ضریب تراکم‌پذیری است که از معادله زیر محاسبه می‌گردد [16]:

$$Z^3 - (1-B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (17)$$

2-1-2- فاز مایع

معادله انرژی در فاز مایع به صورت رابطه (18) می‌باشد:

$$\frac{\partial T_l}{\partial r} = \frac{\alpha_{l,\text{eff}}}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial T_l}{\partial r}\right) \quad (18)$$

شرایط مرزی معادله فوق در سطح و مرکز قطره عبارتند از:

$$\frac{\partial T_l}{\partial r}\Big|_{r=r_s} = \frac{Q_L}{4\pi r_s^2 \lambda_{l,\text{eff}}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0 \quad (20)$$

که در آن $\alpha_{l,\text{eff}} = \chi\alpha_l$ و $\lambda_{l,\text{eff}} = \chi\lambda_l$ به ترتیب ضریب دیفیوژن حرارتی موثر و ضریب هدایت حرارتی موثر فاز مایع می‌باشند. پارامتر χ اثر جریان‌های چرخشی داخل قطره ناشی از حرکت نسبی بین قطره و محیط را در نظر می‌گیرد که به صورت رابطه (21) تعریف می‌گردد:

$$\chi = 1.86 + 0.86\tanh\left[2.245\log\left(\frac{\text{Pe}_L}{30}\right)\right] \quad (21)$$

که در آن عدد پکلت فاز مایع، $\text{Pe}_L = \text{Re}_L\text{Pr}_L$، برحسب سرعت بیشینه در فاز مایع، یعنی سرعت در سطح قطره تعیین می‌گردد. این سرعت بیشینه به صورت رابطه (22) محاسبه می‌شود:

$$U_s = \frac{1}{32}(U_l - U_g)\left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)\text{Re}_g C_F \quad (22)$$

$$C_F = \frac{12.69}{[\text{Re}_g^{2/3}(1+B_M)]} \quad (23)$$

معادله (18)، یک معادله دیفرانسیل با مرز متحرک است. با بی‌بعدسازی معادله با پارامترهای $\tau = \alpha_{l,\text{eff}}t/r_{s0}^2$، $\eta = r/r_s$ و $\theta = (T_l - T_{l0})/T_{l0}$ معادله به معادله‌ای با مرز ثابت تبدیل می‌شود و اثر مرز متحرک به صورت یک ترم از جنس جابجایی به معادله اضافه می‌گردد. جزئیات این بی‌بعدسازی در [17] ارائه شده است. در نظر گرفتن متحرک بودن مرز بر روی مشخصات تبخیر قطره به ویژه در پایان عمر قطره تاثیر دارد [18].

معادله انتقال گونه‌ها در فاز مایع به صورت رابطه (24) می‌باشد [19]:

$$\frac{\partial Y_{i,l}}{\partial t} = \frac{D_{l,\text{eff}}}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial Y_{i,l}}{\partial r}\right) \quad (24)$$

شرایط مرزی برای معادله فوق در سطح و مرکز قطره به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial Y_{i,l}}{\partial r}\Big|_{r=r_s} = \frac{\dot{m}}{4\pi r_s^2 \rho_l D_{l,\text{eff}}}(\varepsilon_i - Y_{i,ls}) \quad (25)$$

$$\frac{\partial Y_{i,l}}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0 \quad (26)$$

در این معادلات $D_{l,\text{eff}} = \chi D_l$ ضریب دیفیوژن موثر است و پارامتر χ از رابطه (21) محاسبه می‌شود با این تفاوت که برای این حالت عدد پکلت به صورت $\text{Pe}_L = \text{Re}_L\text{Sc}_L$ تعریف می‌گردد.

3-1-2- دینامیک قطره

معادلات حرکت قطره با فرض هم‌جهت بودن سرعت قطره و سرعت گاز به صورت تک‌بعدی در نظر گرفته شده‌اند:

$$\frac{dU_l}{dt} = -\frac{3C_D}{8r_s}\left(\frac{\rho_\infty}{\rho_l}\right)|U_l - U_g|(U_l - U_g) \quad (27)$$

که در آن C_D ضریب درگ بوده و به‌صورت رابطه (28) محاسبه می‌گردد:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_g}\left(1 + \frac{\text{Re}_g^{2/3}}{6}\right) \quad (28)$$

در روابط فوق U_l و U_g به ترتیب سرعت قطره و گاز می‌باشد. شعاع قطره در هر گام زمانی به صورت رابطه (29) محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dr_s}{dt} = -\left(\frac{\dot{m}}{4\pi\rho_l r_s^2} + \frac{r_s}{3\rho_l}\frac{d\rho_l}{dt}\right) \quad (29)$$

4-1-2- روند حل

الگوریتم حل معادلات به صورت زیر خواهد بود:

1- با استفاده از دمای سطح و ترکیب سوخت در سطح قطره معلوم از گام زمانی قبل (یا از شرایط اولیه برای گام زمانی اول) کسر مولی و در نتیجه کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره در فاز گاز از معادلات (10) و (11) تعیین می‌گردد. از آن‌جایی که برای محاسبه فوگاسیتی فاز گاز نیاز به دانستن ترکیب گاز می‌باشد، با حدسی اولیه و تکرار تا همگرایی، کسر مولی تعیین می‌گردد.

2- شرایط مرجع فیلم گاز اطراف قطره با توجه به شرایط در سطح قطره و در محیط با قاعده یک‌سوم تعیین می‌گردد.

3- خواص فیلم گاز در شرایط مرجع تعیین می‌گردد. عدد رینولدز به صورت $Re_g = 2\rho_\infty r_s|U_l - U_g|/\mu_g$ و اعداد پرانتل و اشمیت فیلم گاز محاسبه می‌گردند.

4- اعداد شروود و ناسلت استاندارد برای قطره از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{Nu}_0 = 1 + (1 + \text{RePr})^{1/3}\max[1, \text{Re}^{0.077}] \quad (30)$$

$$\text{Sh}_0 = 1 + (1 + \text{ReSc})^{1/3}\max[1, \text{Re}^{0.077}] \quad (31)$$

5- عدد انتقال جرم، B_M ، فاکتور اصلاح F_M و عدد شروود اصلاح شده Sh^* به ترتیب از روابط (3)، (5) و (4) محاسبه می‌شوند. نرخ تبخیر، $\dot{m}$، از معادله (1) تعیین می‌گردد.

6- برای تعیین عدد انتقال حرارت، B_T، به یک روند تکراری نیاز است. ابتدا با فرض $B_T = B_M$، فاکتور اصلاح F_T و عدد ناسلت اصلاح شده از روابط (5) و (8) محاسبه می‌شوند. سپس پارامتر $\emptyset$ و عدد انتقال حرارت جدید به ترتیب

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

از روابط (7) و (6) محاسبه می‌شوند. این روند تا همگرا شدن مقدار عدد انتقال حرارت تکرار می‌گردد.

7- با عدد انتقال حرارت به دست آمده، حرارت نفوذ کرده به درون قطره از معادله (2) محاسبه می‌شود.

8- معادلات انرژی و انتقال گونه‌ها در فاز مایع به صورت عددی حل می‌شوند. برای حل این معادلات از روش تفاضل محدود با گسسته‌سازی کرنک-نیکلسون استفاده شده است. گام مکانی 0.01 شعاع بی‌بعد و گام زمانی 0.01 میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

9- سرعت و شعاع قطره از معادلات (27) و (29) تعیین می‌گردد.

10- در صورت همگرایی نرخ تبخیر و دمای سطح قطره با معیارهای $|\dot{m}-\dot{m}_{\mathrm{old}}|/\dot{m}_{\mathrm{old}} < 10^{-8}$ و $|T_s - T_s^{\mathrm{old}}|/T_s^{\mathrm{old}} < 10^{-4}$ حل برای گام زمانی بعدی انجام می‌گیرد. در صورت عدم همگرایی روند فوق با مقادیر جدید به دست آمده تکرار می‌گردد.

این روند در یک برنامه به زبان فرترن پیاده شده است.

2-2- سوخت‌ها

بیودیزل به سوخت‌های اکسیژنه با پایه استر مشتق از منابع بیولوژیکی اطلاق می‌شود و معمولا از واکنش روغن‌های گیاهی یا حیوانی با اتانول یا متانول در حضور یک کاتالیست تولید می‌گردد [5]. این روش که به نام ترانس استریفیکاسیون نامیده می‌شود به دلیل بازدهی زیاد، نیاز به امکانات کم‌تر و حفظ اتم‌های اکسیژن در بیودیزل از سایر روش‌ها معمول‌تر است [20]. این فرایند منجر به تولید متیل یا اتیل استرها می‌گردد. بیودیزل‌های مختلف ترکیبی متفاوت از این استرها می‌باشند. متیل استرها معمولا با کد اسیدی نشان داده می‌شوند که به صورت کلی $Cn_{\mathrm{acid}}{:}n_{\mathrm{db}}M$ می‌باشد. n_{acid} نشان‌دهنده تعداد اتم‌های کربن در اسید چرب و n_{db} تعداد پیوندهای دوگانه را نشان می‌دهد. تعداد کل کربن‌های موجود در مولکول متیل استر برابر با $n_{\mathrm{acid}}+1$ می‌باشد. برای چنین کد اسیدی فرمول شیمیایی متیل استر به صورت $C_{n\mathrm{acid}+1}H_{2(n\mathrm{acid}+1)-2n\mathrm{db}}O_2$ می‌باشد. فرمول شیمیایی، جرم مولکولی و دمای جوش برخی از متیل استرهای موجود در بیودیزل‌ها در جدول 1 ارائه شده است. در این جدول هم‌چنین درصد مولی هر کدام از متیل استرها در پنج بیودیزل مختلف مطالعه شده در این مقاله، PTE، SME، CSE، BME و PMK مشخص می‌باشد.

3-2- خواص

در مدل‌سازی تبخیر قطره به خواص ترموفیزیکی و انتقال گونه‌های مختلف شیمیایی نیاز می‌باشد. روابط و روش‌های مختلفی توسط محققین برای محاسبه این خواص متیل‌استرها ارائه شده است. برای محاسبه چگالی متیل استر مایع برحسب دما رابطه (32) پیشنهاد شده است [21]:

$$\rho_l = 851.471 + \frac{(250.718n_{\mathrm{db}} + 280.899)}{(1.214 + n_{\mathrm{acid}})} - \left(\frac{7.536}{\ln(n_{\mathrm{acid}}) + 3.584} - 0.446\right)(T - 288.15) \quad (32)$$

لزجت سینماتیکی متیل استرهای اشباع $(n_{\mathrm{db}} = 0)$ در فاز مایع به صورت رابطه (33) محاسبه می‌گردد [22]:

$$\ln[\nu_l \times 10^6] = -2.177 - 0.202n_{\mathrm{acid}} + \frac{403.66}{T} + 109.77\frac{n_{\mathrm{acid}}}{T} \quad (33)$$

لزجت متیل استرهای غیراشباع $(n_{db} > 0)$ در فاز مایع را می‌توان از رابطه‌ی (34) تعیین نمود [23]:

$$\ln\left[\frac{(10^6\nu_l\rho_l)}{(\rho_{l(293.15)}M)}\right] = A_k + \frac{B_k}{T} \quad (34)$$

که در آن $\rho_{l(293.15)}$ و M به ترتیب چگالی مایع در دمای 293.15 کلوین و جرم مولکولی می‌باشند. مقادیر A_k و B_k برای متیل استرهای C16:1M-C24:1M به ترتیب 10.83- و 20.99، برای C18:2M 9.93- و 1721 و برای C18:3M 9.03 و 1343 می‌باشد [10].

ضریب هدایت حرارتی متیل استرهای مایع از فرمول اصلاح‌شده لاتینی محاسبه می‌گردد [10].

$$\lambda_l = \frac{[0.0713T_b^{1.2}(1-T_r)^{0.38}]}{[MT_c^{0.167}T_r^{1/6}]} \quad (35)$$

ظرفیت حرارتی ویژه متیل استر مایع به صورت چندجمله‌ای درجه دو از دما ارائه شده است [24]. ضرایب این معادله در جدول 2 آورده شده است.

$$c_{pl} = a_{pl} + b_{pl}T + c_{pl}T^2 \quad (36)$$

ضریب دیفیوژن در فاز مایع برای تمام گونه‌ها یک‌سان فرض می‌شود و از روش ویلک-چانگ محاسبه می‌شود [16]:

$$D_l = \frac{\left[7.4 \times 10^{-12}\sqrt{\bar{M}}T\right]}{\left[\mu_l V_{\mathrm{nbp}}^{0.6}\right]} \quad (37)$$

که در آن $\bar{M}$ جرم مولکولی متوسط مخلوط بوده و V_{nbp} حجم مولی مخلوط

جدول 1 برخی از مشخصات متیل استرها و درصد مولی هر کدام در بیودیزل‌های مختلف مطالعه شده، اطلاعات برگرفته از [11]

Table 1 some of methyl esters characteristics, mole percentage of each methyl ester in studied biodiesels, data adopted from [11]

فرمول شیمیایی	کد اسیدی	جرم مولکولی (g/mol)	دمای جوش (K)	درصد مولی در سوخت‌ها (%)				
				PTE	SME	CSE	BME	PMK
$C_9H_{18}O_2$	C8:0M	144.212	467.5	-	-	-	5.19	2.6
$C_{11}H_{22}O_2$	C10:0M	172.265	501.1	-	-	-	2.8	4.0
$C_{13}H_{26}O_2$	C12:0M	214.338	530.4	-	-	-	3.4	50.0
$C_{15}H_{30}O_2$	C14:0M	242.39	554.2	0.5	0.3	2.0	10.99	17.0
$C_{17}H_{34}O_2$	C16:0M	270.442	578.0	8.0	10.90	19.0	31.66	8.0
$C_{19}H_{38}O_2$	C18:0M	298.494	601.8	4.0	4.40	2.0	10.79	1.7
$C_{21}H_{42}O_2$	C20:0M	326.546	625.6	7.0	0.4	-	0.4	1.5
$C_{23}H_{46}O_2$	C22:0M	354.598	649.3	7.0	-	-	0.4	1.5
$C_{17}H_{32}O_2$	C16:1M	268.426	577.6	15.0	-	-	2.4	0.4
$C_{19}H_{36}O_2$	C18:1M	296.478	601.3	49.0	24.0	31.0	26.37	12.0
$C_{21}H_{40}O_2$	C20:1M	324.533	625.1	-	-	2.5	-	-
$C_{23}H_{44}O_2$	C22:1M	352.582	648.8	-	-	2.5	1.0	-
$C_{19}H_{34}O_2$	C18:2M	294.462	601.3	23.0	52.8	41.0	3.0	1.3
$C_{19}H_{32}O_2$	C18:3M	292.446	601.6	-	7.20	-	0.6	-

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

در دمای جوش نرمال است که به‌صورت رابطه (38) محاسبه می‌شود:

$$V_{\mathrm{nbp}} = (1.2441\bar{M}^{0.297})^3 \tag{38}$$

فشار بخار اشباع کاهش‌یافته متیل استرها در هر دما از روش لی-کسلر تخمین زده می‌شود [23]:

$$P_{v,r} = f_0(T_r) + \omega f_1(T_r)$$

$$f_0 = 5.92714 - 6.09648T_r^{-1} - 1.2886\ln T_r + 0.169347T_r^6$$

$$f_1 = 15.2518 - 15.6875T_r^{-1} - 13.4721\ln T_r + 0.43577T_r^6$$

$$\omega = \frac{[-\ln P_c - f_0(T_{br})]}{f_1(T_{br})} \tag{39}$$

که در آن T_{br} دمای جوش کاهش‌یافته می‌باشد. برای گاز از معادله حالت گاز واقعی پنگ-رابینسون استفاده شده است. مشاهده شده است که به کارگیری این معادله حالت در محاسبات تبخیر قطره به نتایج دقیق‌تری نسبت به دیگر معادلات حالت درجه سه منجر می‌گردد [25]. خواص بحرانی گاز محیط از [26] استخراج شده و خواص بحرانی متیل استرها با روش ژاکوب [16] محاسبه شده است. به منظور محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه بخار متیل استرها از رابطه (40) استفاده شده است [24]:

$$c_{pv} = \frac{4.184C_{pv0}C_{pv1}}{M}$$

$$C_{pv0} = (6.3756n_{\mathrm{acid}} + 6.6472)\ln(T) - 31361n_{\mathrm{acid}} - 26118$$

$$C_{pv1} = \exp[(0.01105\ln(T) - 0.0425)n_{\mathrm{db}}] \tag{40}$$

گرمای نهان تبخیر متیل استرها را می‌توان به صورت رابطه (41) محاسبه نمود [23]:

$$L = L_{\mathrm{nbp}}\frac{T_r}{T_{br}}\left(\frac{X + X^{0.35298}}{1 + X^{0.13856}}\right)$$

$$X = \frac{T_{br}}{T}\left(\frac{1-T_r}{1-T_{br}}\right)$$

$$L_{\mathrm{nbp}} = RT_c\left(T_{br}\frac{\ln(P_c/1.01325)}{1 - T_{br}}\right) \tag{41}$$

که در آن L_{nbp} گرمای نهان تبخیر در دمای جوش نرمال می‌باشد. برای مخلوط گاز محیط و بخار سوخت، با فرض این‌که بخار سوخت در گاز رقیق می‌باشد می‌توان از لزجت و ضریب هدایت حرارتی محیط استفاده نمود [10]. ظرفیت حرارتی گاز محیط از چند جمله‌ای ارائه شده توسط ناسا [27] و ضریب هدایت حرارتی و لزجت آن نیز از رابطه ارائه شده ناسا [28] محاسبه می‌شوند که به ترتیب در روابط (41) و (42) ارائه شده‌اند.

$$\frac{c_p}{R} = \frac{a_1}{T^2} + \frac{a_2}{T} + a_3 + a_4T + a_5T^2 + a_6T^3 + a_7T^4 \tag{42}$$

$$\left.\begin{matrix}\mu\\ \lambda\end{matrix}\right\} = A\ln T + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + D \tag{43}$$

جدول 2 ضرایب معادله (36) برای محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه مایع متیل استرها [24]

Table 2 Coefficients of Eq. (36) for liquid ,ethyl esters specific heat [24]

	a_{pl}	b_{pl}	c_{pl}
C8:0M-C24:0M	1.816	-1.462×10^{-3}	7.51×10^{-6}
C16:1M-C24:1M	1.915	-2.163×10^{-3}	8.29×10^{-6}
C18:2M	2.018	-2.878×10^{-3}	9.09×10^{-6}
C18:3M	2.115	-3.580×10^{-3}	9.92×10^{-6}

که ثوابت معادلات (41) و (42) برای گونه‌های شیمیایی مختلف در[28,27] ارائه شده است.

ضریب دیفیوژن جرم نیز برای بخار تمام متیل استرها در هوا یک‌سان در نظر گرفته شده و از رابطه‌ی (44) محاسبه می‌گردد [10]:

$$D_g = 2\times10^{-10}\frac{T^{1.75}}{P} \tag{44}$$

روابط فوق برای محاسبه خواص در فشارهای پایین مناسب بوده و در فشارهای بالا فاکتور اصلاحی باید بر روی آن‌ها اعمال گردد. اثر اصلاحی فشار بر روی ظرفیت حرارتی ویژه از معادله حالت پنگ-رابینسون محاسبه شده است [16]. اثر فشار بر روی ضریب هدایت حرارتی گاز با استفاده از رابطه استیل و تودوس به حساب آورده شده است [29]. تاثیر فشار بر روی لزجت گاز نیز از طریق رابطه ریچنبرگ در نظر گرفته شده است [16].

3- نتایج

در این بخش پس از سنجش صحت مدل از طریق مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی و نتایج عددی، اثر ترکیب سوخت، دمای محیط، فشار محیط و سرعت پاشش بر روی تبخیر قطره بیودیزل مطالعه می‌گردد.

3-1- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل از داده‌های تجربی دایف و همکاران [30] و نتایج عددی کیتانو و همکاران [31] استفاده شده است. در مطالعه تجربی قطره دوجزئی هپتان-دکان (با ترکیب 76%-24% وزنی) با شعاع اولیه 0.665 میلی‌متر و دمای اولیه 294 کلوین در یک تونل باد در معرض هوای گرم با دمای 348 کلوین و سرعت 3.1 m/s قرار دارد. آزمایش در فشار اتمسفر یک انجام گرفته است. مقایسه بین نتایج مطالعه حاضر با داده‌های تجربی و محاسبات عددی در شکل 1 نشان داده شده است. محاسبات کیتانو و همکاران نیز با رهیافتی مشابه مطالعه حاضر انجام گرفته است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی مشاهده می‌شود و بیشترین خطا در محاسبه شعاع قطره 8% می‌باشد. مدل حاضر دمای نهایی سطح قطره را نزدیک به 5 کلوین بیشتر تخمین می‌زند.

3-2- اثر ترکیب سوخت

به منظور بررسی اثر ترکیب بیودیزل بر رفتار تبخیر قطره، تبخیر پنج بیودیزل مختلف بررسی شده است. بدین منظور محیط، هوا با ترکیب 79% مولی نیتروژن و 21% مولی اکسیژن با دمای 800 کلوین و فشار 15 بار در نظر گرفته شده است. قطره با شعاع اولیه 10 میکرومتر، با دمای اولیه 300 کلوین و با سرعت اولیه 5 متر بر ثانیه وارد محیط می‌شود. محاسبات تا زمانی که شعاع قطره به 0.2 مقدار اولیه‌اش برسد ادامه یافته است. در شکل 2 تغییرات زمانی شعاع بی‌بعد (r_s/r_{s0}) و دمای سطح قطره (T_s) نشان داده شده است. در شکل 2 الف مشاهده می‌شود که بیودیزل PMK و PTE به‌ترتیب کوتاه‌ترین و طولانی‌ترین عمر را دارند. با توجه به ترکیب بیودیزل‌ها، ارائه شده در جدول 1 مشاهده می‌شود که اجزای عمده تشکیل‌دهنده بیودیزل PMK متیل استرهای سبک‌تر و اشباع می‌باشند و به همین دلیل نرخ تبخیر این بیودیزل بیشتر و در نتیجه عمر آن کوتاه‌تر است. در شکل 2 ب نیز مشاهده می‌شود که این بیودیزل کمترین دمای نهایی سطح را خواهد داشت که این امر با توجه به دمای جوش پایین‌تر اجزای عمده تشکیل‌دهنده‌ی آن، قابل انتظار می‌باشد. هم‌چنین در همین شکل مشاهده می‌شود که برخی از سوخت‌ها در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

زمان‌های نزدیک به پایان عمر خود افزایشی ناگهانی در دمای سطح از خود نشان می‌دهند. از آن‌جایی که در ابتدای عمر قطره اجزای سبک‌تر تبخیر می‌شوند، در پایان عمر قطره بیشتر ترکیب قطره را اجزای سنگین‌تر تشکیل می‌دهند. از این رو در این مرحله دمای سطح قطره افزایش می‌یابد. این رفتار در دمای سطح در مدل‌های تبخیر قطرات چندجزئی توسط محققین دیگر نیز مشاهده شده است [11,10]. هر چه تفاوت بین فراریت اجزا بیشتر باشد، این افزایش مشخص‌تر می‌باشد. در صورتی که اختلاف فراریت اجزای غالب بیودیزل کم باشد، این رفتار ضعیف‌تر شده و مشاهده نمی‌شود.

3-3- اثر دمای محیط

اثر دمای محیط با بررسی تبخیر قطره بیودیزل PTE با قطره 20 میکرومتر در دو دمای 600 و 1000 کلوین مطالعه شده است. در هر دو حالت فشار محیط 15 بار و سرعت اولیه قطره 5 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مانند قبل، محاسبات تا رسیدن قطر به 0.2 مقدار اولیه انجام شده است. در شکل 3 دمای سطح و مرکز قطره برای دو دما نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، دمای محیط بیشتر به نرخ تبخیر بیشتر و در نتیجه عمر کوتاه‌تر قطره منجر می‌گردد. توجه شود که زمان برای دمای 1000 کلوین در محور فوقانی شکل نشان داده شده است.

با افزایش دمای محیط اختلاف بین دمای سطح و مرکز قطره افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در دمای محیط بیشتر گرادیان دمای بزرگتری در قطره وجود دارد. در حالی که در دمای محیط کم، دمای قطره در مراحل پایانی عمر قطره تقریبا یکنواخت می‌گردد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در دمای محیط کم نرخ افزایش دمای قطره بزرگتر می‌باشد. در دمای محیط بیشتر هر چند که حرارت بیشتری از فاز گاز به فاز مایع منتقل می‌شود، اما در ابتدای عمر قطره این حرارت بیشتر صرف تبخیر شده و کمتر به درون قطره نفوذ کرده و باعث گرم شدن قطره می‌گردد. از آن‌جایی که در دمای محیط کم، حرارت کمتری از فاز گاز به مایع منتقل می‌شود، حرارت لازم برای تامین گرمای نهان تبخیر کمتر وجود داشته و به همین دلیل حرارت بیشتر صرف گرمایش می‌گردد.

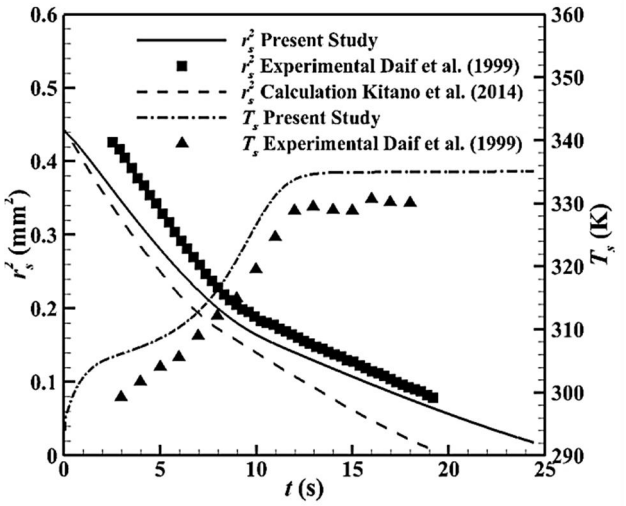
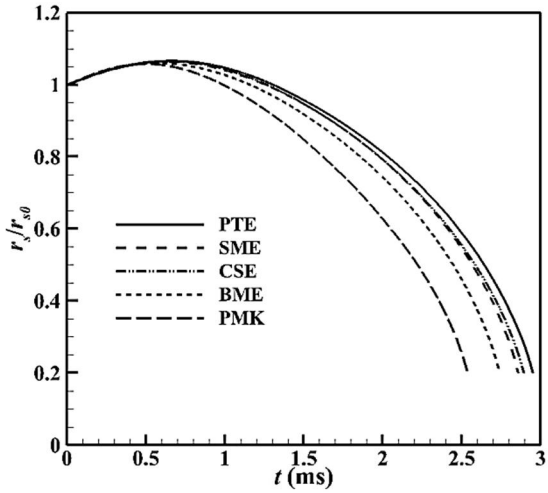
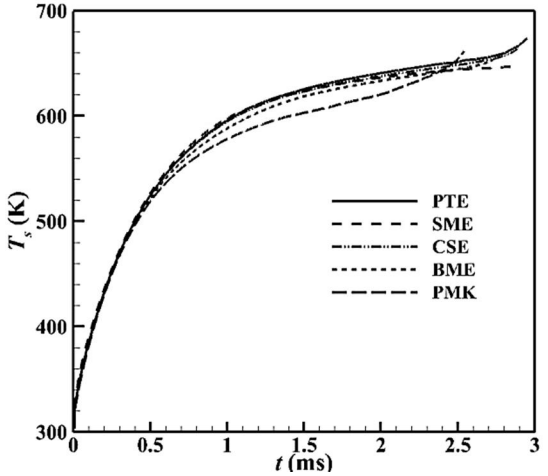


Fig. 1 droplet surface Comparison between present study and experimental and numerical results

شکل 1 مقایسه تغییرات سطح قطره به دست آمده از مطالعه حاضر با داده‌های تجربی و نتایج محاسباتی



الف a



ب b

Fig. 2 a) temporal variations of droplet non-dimensional radius for different biodiesels b) variations of droplet surface temperature

شکل 2 الف) تغییرات زمانی شعاع بی‌بعد قطره بیودیزل‌های مختلف ب) تغییرات زمانی دمای سطح قطره بیودیزل‌های مختلف

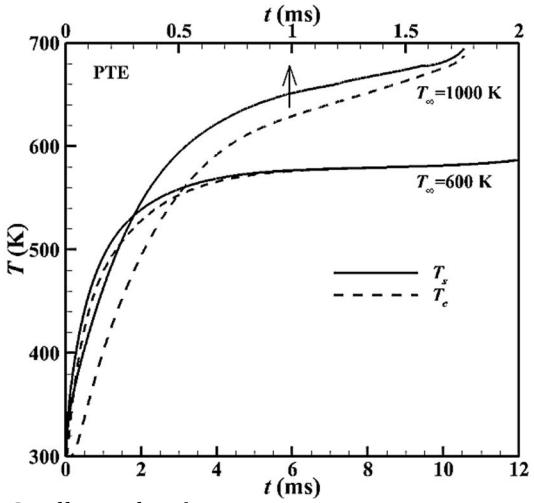


Fig. 3 Effects of ambient temperature on temperatures of surface and center of droplet of PTE biodiesel

شکل 3 تاثیر دمای محیط بر روی دمای سطح و مرکز قطره بیودیزل PTE

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

تاثیر دمای محیط بر نرخ تبخیر بیودیزل PMK در شکل 4 نشان داده شده است. سه دمای محیط 600، 800 و 1000 کلوین مطالعه شده و سایر شرایط همان شرایط شکل 3 می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش دمای محیط منجر به افزایش شدید نرخ تبخیر می‌گردد. با افزایش دمای محیط و در نتیجه مهیا بودن حرارت بیشتر، نرخ تبخیر سریع‌تر افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه قطر قطره و به تبع آن مساحت سطح قطره نیز سریع‌تر کاهش می‌یابد. به همین دلیل نرخ تبخیر در دماهای زیادتر پس از رسیدن به بیشینه خود با نرخ بزرگتری کاهش می‌یابد.

3-4- اثر فشار محیط

به منظور بررسی اثر فشار محیط، تبخیر قطره بیودیزل SME در سه فشار 1، 15 و 30 بار بررسی شده است. هم‌چنین برای مطالعه اثر فشار در دماهای مختلف دو دمای محیط 600 و 800 کلوین نیز بررسی شده‌اند. پارامترهای دیگر همان مقادیر پیشین را دارند. همان‌گونه که در شکل 5 الف مشاهده می‌شود در دمای پایین، افزایش فشار باعث افزایش عمر قطره می‌گردد هم‌چنین مشاهده می‌شود که دمای سطح قطره با افزایش فشار افزایش می‌یابد؛ در نتیجه حرارت بیشتری به درون قطره نفوذ کرده و صرف گرمایش می‌شود و حرارت کمتری صرف تبخیر می‌شود. بنابراین عمر قطره افزایش می‌یابد. نکته دیگری که قابل توجه می‌باشد، رسیدن دمای سطح قطره به مقداری پایا می‌باشد. با افزایش فشار این مقدار پایای نهایی به دمای محیط نزدیک‌تر می‌گردد. برای دمای محیط 800 کلوین، که نتایج آن در شکل 5 ب نشان داده شده است، دمای قطره به ویژه در فشارهای زیاد همواره در حال افزایش است. هر چند نرخ افزایش دما در اواخر عمر قطره کاسته می‌شود، اما دما به مقدار پایایی، به ویژه در فشار 1 بار، نمی‌رسد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در این دما با افزایش فشار از 1 به 15 بار عمر قطره بیشتر می‌شود. اما با افزایش بیشتر فشار از 15 بار به 30 بار عمر قطره کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان ناشی از تأثیر فشار و دمای محیط بر تعادل فاز دانست. در دمای محیط زیادتر، دمای قطره به مقدار بیشتری می‌رسد و در نتیجه اثر دما بر تعادل فاز بیشتر از اثر فشار شده [32]، که این امر منجر به کاهش عمر قطره می‌گردد.

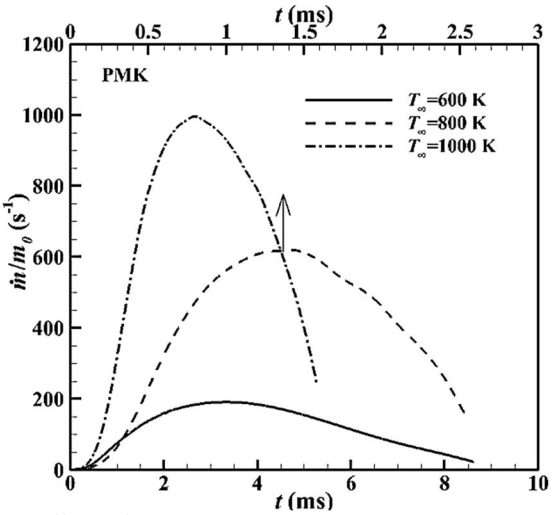


Fig. 4 Effects of ambient temperature on vaporization rate of PMK biodiesel

شکل 4 اثر دمای محیط بر نرخ تبخیر بیودیزل PMK

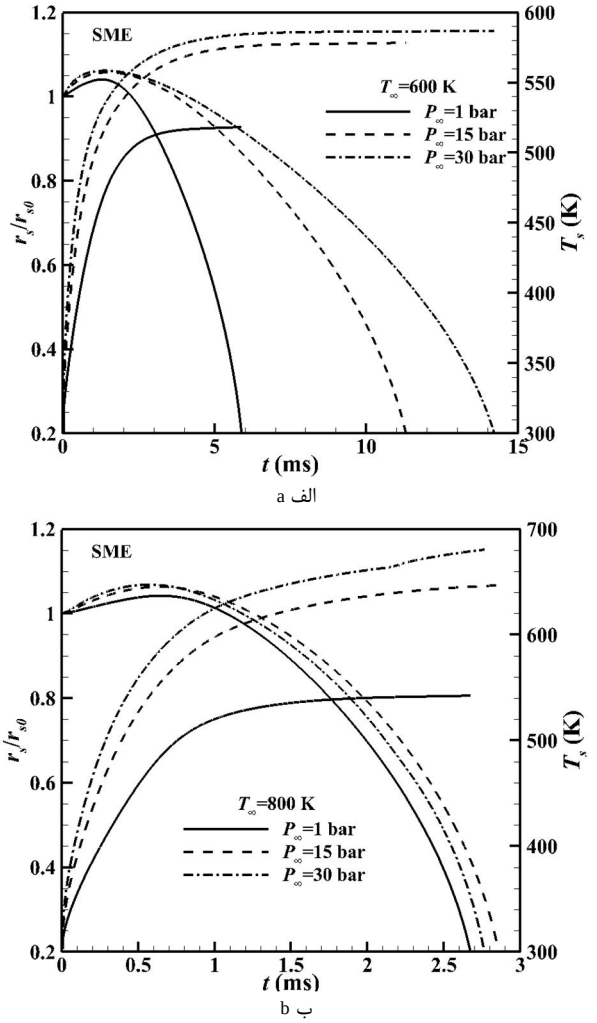


Fig. 5 Effects of ambient pressure on SME biodiesel droplet radius and surface temperature a)ambient temperature 600 K b) ambient temperature 800 K

شکل 5 تاثیر فشار محیط بر تغییرات شعاع و دمای قطره بیودیزل SME الف) دمای محیط 600 کلوین ب) دمای محیط 800 کلوین

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد اثر فرایندهای گذرای فاز گاز در فشارهای زیاد است. همان‌گونه که ماتالون و لا [33] نشان داده‌اند، فرایندهای گذرای فاز گاز باعث تغییر نرخ تبخیر قطره با مرتبه $O(\sqrt{\rho_g/\rho_l})$ می‌شود.

با افزایش فشار نسبت چگالی گاز به چگالی مایع افزایش می‌یابد. در نتیجه هر چه فشار بیشتر شود، تاثیر فرایندهای گذرای فاز گاز در نرخ تبخیر قطره افزایش می‌یابد. هر چند مطالعات تبخیر متعددی از فرض شبه‌پایا در فاز گاز برای مدل کردن تبخیر قطرات در فشارهای زیاد استفاده نموده‌اند [34,11,10]، نشان داده شده است که در فشارهای زیاد دقت فرض شبه‌پایا برای فاز گاز کاهش می‌یابد [15]. در این مطالعه نیز از این فرض استفاده شده است. از این رو نتایج آن ممکن است در فشارهای زیاد دقت لازم را نداشته باشند.

3-5- تاثیر سرعت اولیه قطره

سرعت اولیه تزریق قطره به درون محفظه تاثیری مستقیم بر نرخ انتقال حرارت و جرم، و در نتیجه بر نرخ تبخیر دارد. اثر سرعت اولیه پاشش قطره

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

بیودیزل BME با قطر اولیه 20 میکرومتر و در دما و فشار محیط 800 کلوین و 15 بار مطالعه شده است. با افزایش سرعت قطره احتمال شکست قطره نیز افزایش می‌یابد. احتمال شکست قطرات با توجه به عدد وبر، که نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی است، مشخص می‌گردد. کشش سطحی متیل استرها و بیودیزل با استفاده از روش ارائه شده در [35] محاسبه شد. عدد وبر در لحظه اولیه برای سرعت‌های 5، 10 و 20 متر بر ثانیه به ترتیب 0.11، 0.44 و 1.75 محاسبه گردید. بنابراین فرض عدم شکست قطرات و بررسی تبخیر آن‌ها به صورت یک قطره کروی معقول می‌باشد. تغییرات شعاع و دمای سطح قطره در این حالت در شکل 6 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت اولیه نرخ افزایش دما در قطره بیشتر شده و در نتیجه عمر قطره کاهش می‌یابد. از آن‌جایی که نرخ انتقال حرارت از فاز گاز به قطره و نرخ انتقال جرم بخار سوخت به گاز محیط، که به ترتیب با عدد ناسلت و شروود تعیین می‌شوند، رابطه‌ای مستقیم با عدد رینولدز و در نتیجه سرعت قطره دارند، این نتیجه قابل انتظار بود. نکته دیگری که باید بدان توجه نمود دمای نهایی سطح قطره است که مستقل از سرعت قطره می‌باشد. بنابراین هر چند افزایش سرعت، نرخ انتقال حرارت به قطره را افزایش می‌دهد اما تاثیری بر مقدار کل حرارت منتقل شده به قطره ندارد.

3-6- تبخیر نزدیک به شرایط بحرانی

فشار محیط در اکثر کاربردها بیشتر از فشار بحرانی سوخت می‌باشد. هر چند دمای قطره در ابتدا کمتر از دمای بحرانی است اما می‌تواند در اثر گرمایش به دمای بحرانی برسد. هنگامی که سوخت به دمای بحرانی برسد، تمایز بین مایع و گاز از بین می‌رود. هم‌چنین کشش سطحی مایع بسیار کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند منجر به تغییر در مکانیزم کنترل‌کننده تبخیر گردد [17]. در سوخت‌های چندجزئی ممکن است یکی از اجزا به شرایط بحرانی برسد در حالی که دیگر اجزا هم‌چنان در شرایط زیر-بحرانی باشند. البته توجه به این نکته اهمیت دارد که بحرانی شدن شرایط برای یک جزء هنگامی اثر مهمی بر شرایط تبخیر دارد، که آن جزء در هنگام رسیدن به شرایط بحرانی مقدار قابل توجهی در سوخت داشته باشد. به منظور تعیین شرایط بحرانی و هم‌چنین در نظر گرفتن مقدار هر کدام از اجزا در سوخت، دمای بحرانی برای مخلوط به صورت رابطه (45) تعریف می‌گردد [16]:

$$T_{cM} = \sum_i x_i T_{c,i} \tag{45}$$

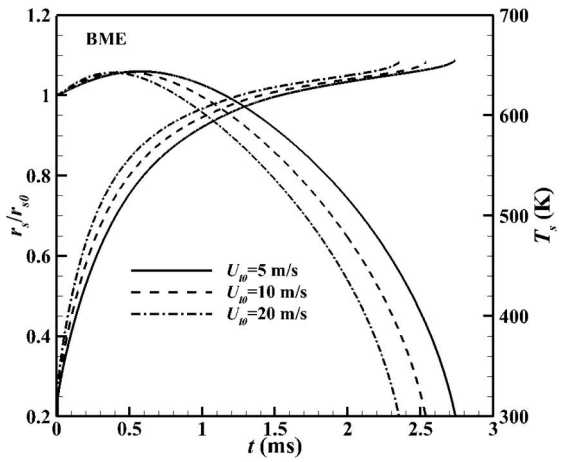


Fig. 6 Effects of droplet initial velocity on BME biodiesel droplet radius and surface temperature

شکل 6 اثر سرعت اولیه تزریق قطره بر تغییرات شعاع و دمای سطح قطره بیودیزل BME

که در آن x کسر مولی بالک اجزا در قطره است. در هر لحظه دمای بحرانی جزء با بیشترین مقدار در ترکیب اثر غالب را در تعیین دمای بحرانی مخلوط دارد. در شکل 7 دمای سطح کاهش یافته با دمای بحرانی مخلوط برای بیودیزل CSE در شرایط مختلف نشان داده شده است. دمای سطح به دلیل این که در هر لحظه دمای بیشینه قطره می‌باشد، انتخاب شده است. مشاهده می‌شود که در گستره دمایی و فشاری مطالعه شده برای بیودیزل CSE دمای قطره به دمای بحرانی مخلوط نمی‌رسد. دمای قطره در دمای 1500 کلوین و فشار 30 بار (خط نقطه‌چین) در انتهای عمر قطره رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که مدل‌های شبه‌پایا دمای سطح قطره را کمتر تخمین می‌زنند می‌توان نتیجه گرفت، در این حالت احتمالا قطره به شرایط بحرانی می‌رسد. در شرایط بحرانی که تمایز مایع و گاز از بین می‌رود و نسبت چگالی آن‌ها تقریبا واحد می‌گردد، اثر فرایندهای گذرا در فاز گاز اهمیت زیادی داشته و تقریب شبه‌پایا مناسب نمی‌باشد. هر چند از این تقریب برای مطالعه تبخیر در فشارهای زیاد استفاده شده است [11]، اما پیشنهاد می‌گردد در چنین شرایطی به منظور حصول نتایج قابل اتکا از مدل-های گذرا برای فاز گاز استفاده گردد.

3-7- نفوذ بخار سوخت در فاز گاز

هرچند در مدل حاضر معادلات فاز گاز با فرض رفتار شبه‌پایا حل شده‌اند و در نتیجه بخار سوخت در هر لحظه تا لبه لایه مرزی جرم نفوذ می‌کند. اما تغییرات ضخامت لایه‌های مرزی جرم و حرارت در اثر جریان استفان در این مدل در نظر گرفته شده است. فاصله لبه لایه مرزی از مرکز قطره در هر لحظه را می‌توان از عدد شروود اصلاح شده محاسبه نمود [36]:

$$r_{\mathrm{bm}} = r_s \frac{\mathrm{Sh}^*}{\mathrm{Sh}^* - 2} \tag{46}$$

این فاصله در واقع شعاع کره‌ای از فضاست که بخار سوخت در آن وجود دارد. با توجه به رابطه فوق و هم‌چنین تعریف عدد شروود و عدد شروود اصلاح شده، معادلات (31) و (4)، مشخص است که در انتهای عمر قطره که سرعت نسبی قطره کوچک می‌شود، ضخامت لایه مرزی بسیار بزرگ می‌گردد. در شکل 8 تغییرات شعاع تاثیر بخار سوخت در فشار و دمای محیط مختلف برای بیودیزل‌های PTE و PMK نشان داده شده است. مقدار اولیه شعاع تاثیر علی‌رغم کوچک بودن صفر نمی‌باشد که ناشی از فرض شبه‌پایا است.

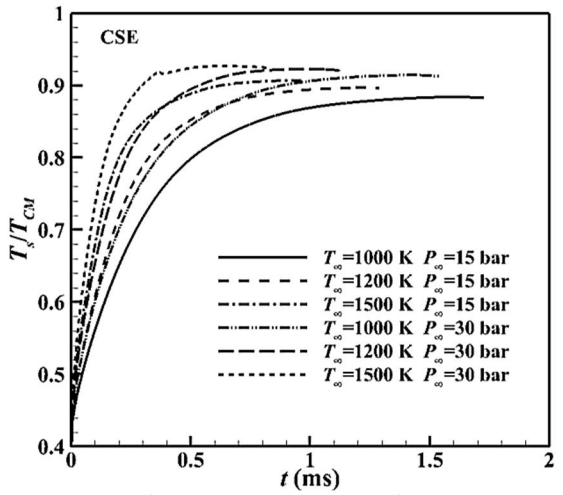
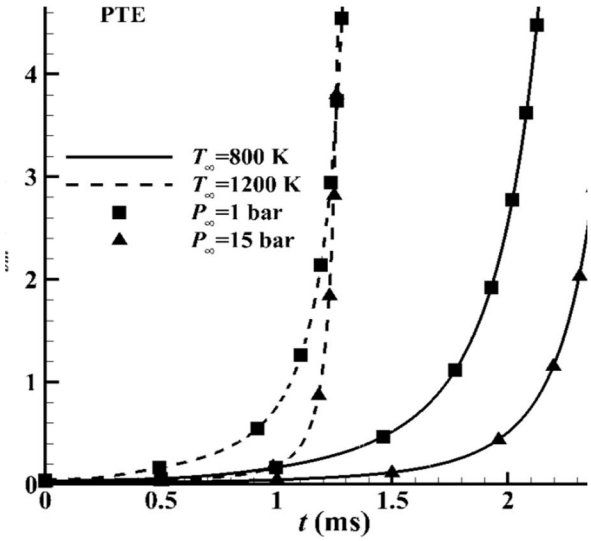


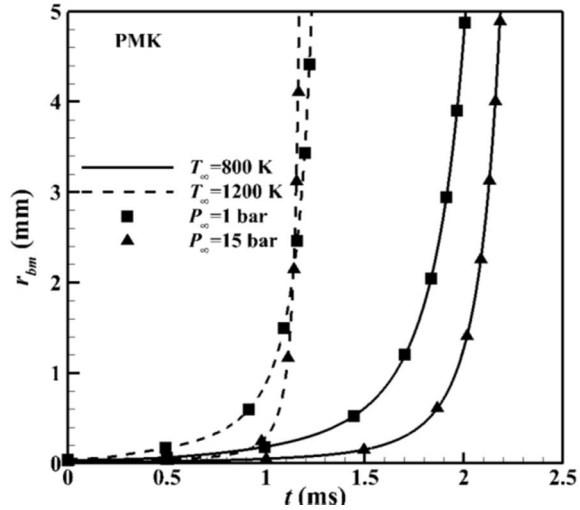
Fig. 7 Droplet surface reduced temperature for CSE biodiesel at different ambient pressures and temperatures

شکل 7 دمای سطح کاهش یافته برای بیودیزل CSE در محیط با فشار و دمای مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]



الف a



ب b

Fig. 8 Radius of influenced sphere from biodiesel vapor a) PTE b) PMK

شکل 8 شعاع کره متاثر از بخار سوخت برای بیودیزل‌های الف) PTE ب) PMK

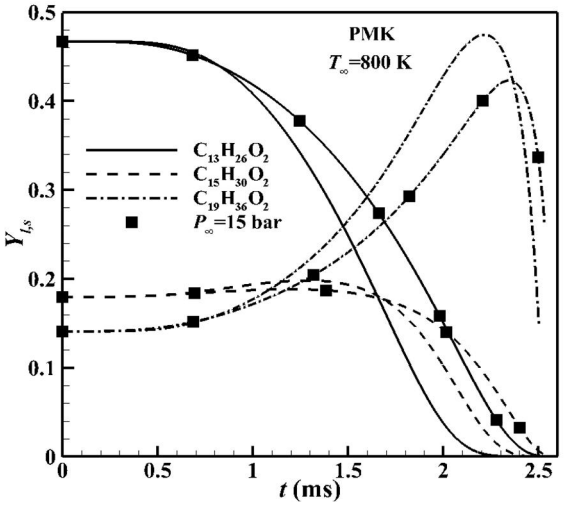
همان‌گونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان شعاع تاثیر بخار سوخت با نرخ فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که در این شکل به دلیل امکان نمایش تغییرات شعاع نفوذ تنها تا 5 میلی‌متر رسم شده است. افزایش دما به بزرگتر شدن شعاع تاثیر می‌انجامد که می‌تواند ناشی از افزایش نرخ تبخیر و هم‌چنین افزایش ضریب نفوذ جرمی بخار سوخت باشد. افزایش فشار اما شعاع تاثیر را کاهش می‌دهد و تأثیر فشار در دماهای کم و در ابتدای عمر قطره محسوس‌تر است. نفوذ سریع‌تر و بیشتر بخار سوخت به تشکیل سریع‌تر مخلوط قابل احتراق بخار-هوا منجر می‌گردد و در نتیجه می‌تواند به کاهش تاخیر اشتعال و هم‌چنین نزدیک‌تر شدن احتراق به احتراق پیش‌آمیخته گردد. هر دو سوخت رفتاری مشابه از خود نشان می‌دهند.

3-8- فاز مایع

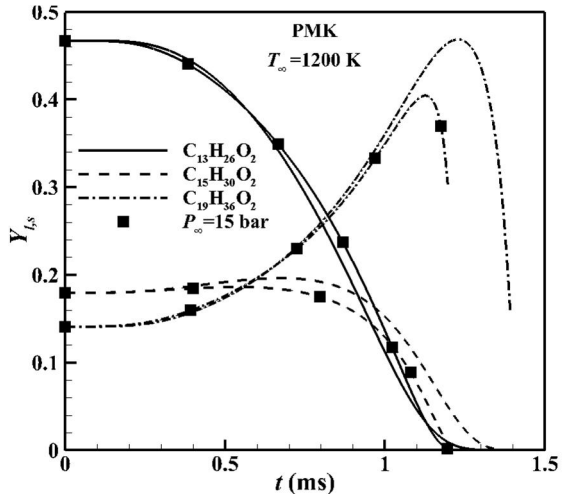
تغییرات شرایط محیط و در نتیجه تغییر در نرخ انتقال جرم و حرارت بر حالت فاز مایع نیز تاثیر می‌گذارد. در شکل 9 تغییرات کسر جرمی سه جزء اصلی بیودیزل PMK ارائه شده است. در شکل 9 الف دمای محیط 1200 کلوین و در شکل 9 ب 800 کلوین می‌باشد. در هر دو شکل فشارهای 1 و 15 بار نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که کسر جرمی سبک‌ترین جزء در سطح قطره با گذشت زمان کاهش می‌یابد. دو جزء دیگر ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند. شدت افزایش اولیه با سنگین‌تر شدن جزء بزرگ‌تر می‌گردد. در ابتدای عمر قطره تغییر فشار محیط تاثیر زیادی بر ترکیب قطره در سطح ندارد. با گذشت زمان در فشار محیط زیادتر، کسر جرمی جزء سبک‌تر بیشتر شده و کسر جرمی اجزاء سنگین‌تر کوچک‌تر می‌گردد. با افزایش فشار محیط دمای سطح قطره نیز بیشتر می‌شود در نتیجه نرخ تبخیر اجزای سبک‌تر افزایش خواهد یافت. در نتیجه گرادیان بیشتری برای این اجزا در قطره بوجود می‌آید و این اجزا از درون قطره به سطح نفوذ می‌کنند. به همین دلیل نیز در فشارهای بالا اجزای سبک‌تر سریع‌تر تبخیر شده و کسر جرمی آن‌ها به صفر می‌رسد. در دمای 800 کلوین، در انتهای عمر قطره کسر جرمی اجزای سنگین‌تر در فشار زیادتر، بزرگتر از کسر جرمی در فشار کم‌تر می‌گردد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک یک مدل عددی رفتار تبخیر بیودیزل‌های مختلف در



الف a



ب b

Fig. 9 Mass fractions of some components of PMK biodiesel at droplet surface at 1 and 15 bar a) 800 K b) 1200 K

شکل 9 تغییرات کسر جرمی برخی از اجزای بیودیزل PMK در سطح قطره در فشارهای 1 و 15 بار و الف) دمای 800 کلوین ب) دمای 1200 کلوین

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

شرایط مختلف کاری بررسی شد. مدل استفاده شده تعمیم مدل رایج ارائه شده توسط آبرامزون و سیریگنانو برای قطرات چندجزئی است. در این مدل معادلات حاکم فاز گاز بر پایه تئوری فیلم و به صورت تحلیلی حل شده و روابطی صریح برای نرخ تبخیر و حرارت منتقل شده به قطره به دست می‌آید. معادلات فاز مایع نیز به صورت عددی حل گردیده‌اند. از معادله حالت گاز واقعی پنگ-رابینسون استفاده شده و اثر فشارهای زیاد بر خواص فاز گاز و هم‌چنین تعادل فاز در نظر گرفته شده است. مطالعه بر روی پنج بیودیزل PTE، SME، CSE، BME و PMK با ترکیب‌های مختلف انجام شد. نتایج اصلی این مطالعه عبارتند از:

- تاثیر ترکیب بیودیزل‌ها بر عمر قطره چندان قابل توجه نمی‌باشد. از میان پنج بیودیزل مطالعه شده، بیودیزل PTE طولانی‌ترین و بیودیزل PMK کوتاهترین عمر را از خود نشان می‌دهند و تفاوت بین عمر این دو نزدیک به 20% می‌باشد. دیگر بیودیزل‌های تفاوت عمر کمتری دارند. هم‌چنین مشاهده شد دمای سطح قطره ابتدا افزایشی سریع پیدا می‌کند و سپس با نرخی کم‌تری به افزایش ادامه می‌دهد.
- افزایش دمای محیط به افزایش نرخ تبخیر و در نتیجه کاهش عمر قطره می‌انجامد. هم‌چنین با افزایش دمای محیط گرادیان دما درون قطره بزرگتر می‌گردد. در دمای محیط کمتر، نرخ افزایش دمای قطره در ابتدای عمر قطره بزرگ‌تر از حالت با دمای محیط بزرگتر است که می‌توان آن را ناشی از اثر گرمای نهان تبخیر دانست.
- افزایش فشار محیط در دماهای کم و زیاد تاثیر متفاوتی بر رفتار قطره می‌گذارند. در دمای کم، بیشتر شدن فشار محیط به افزایش عمر می‌انجامد. اما در دمای زیاد، ابتدا افزایش فشار منجر به طولانی شدن عمر قطره می‌گردد و سپس عمر کاهش می‌یابد. دلیل این تفاوت تاثیری است که دما و فشار بر تعادل فاز در سطح قطره و در نتیجه غلظت بخار سوخت دارند. با افزایش دما تاثیر فشار در تعادل کمتر شده و اثر دما بیشتر می‌شود.
- با افزایش دما و فشار محیط، دمای قطره به دمای بحرانی نزدیک‌تر شده و دقت تقریب فاز گاز شبه‌پایا در تبخیر قطره کاهش می‌یابد. با این وجود در فشار و دماهای مطالعه شده قطره به حالت بحرانی نرسید.
- افزایش سرعت اولیه پاشش قطره، به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم، نرخ تبخیر را افزایش داده و عمر قطره را کاهش می‌دهد. مشاهده شده است که با چهار برابر کردن سرعت اولیه قطره عمر قطره نزدیک به 15% کاهش می‌یابد.
- شعاع تاثیر بخار سوخت با افزایش دمای محیط بزرگتر شده و با افزایش فشار کوچک‌تر می‌گردد.
- افزایش فشار به بزرگتر شدن کسر جرمی اجزای سبک‌تر در سطح قطره در فاز مایع شده و کسر جرمی اجزای سنگین‌تر را کاهش می‌دهد.

5- فهرست علائم

B_M	عدد انتقال جرم
B_T	عدد انتقال حرارت
c_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($\mathrm{kJ\ kg^{-1}K^{-1}}$)
C_D	ضریب درگ
C_F	ضریب اصطکاک
D	ضریب دیفیوژن جرم ($\mathrm{m^2\ s^{-1}}$)
F	فاکتور اصلاح
F_M	فاکتور اصلاح جرم
F_T	فاکتور اصلاح دما
L	گرمای نهان تبخیر ($\mathrm{kJ\ kg^{-1}}$)
$\dot{m}$	نرخ تبخیر ($\mathrm{kg\ s^{-1}}$)
M	جرم مولکولی ($\mathrm{g\ mol^{-1}}$)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (bar)
Pr	عدد پرانتل
Q_L	حرارت نفوذ کرده به درون قطره ($\mathrm{kJ\ kg^{-1}}$)
r	مختصه شعاعی
Re	عدد رینولدز
Sc	عدد اشمیت
Sh	عدد شروود
T	دما (K)
U	سرعت ($\mathrm{m\ s^{-1}}$)
x	کسر مولی
Y	کسر جرمی
Z	ضریب تراکم‌پذیری

علائم یونانی

α	ضریب دیفیوژن حرارتی ($\mathrm{m^2\ s^{-1}}$)
φ	ضریب فوگاسیتی
$\emptyset$	پارامتر معادله (7)
η	شعاع بی‌بعد
λ	ضریب هدایت حرارتی ($\mathrm{kW\ m^{-1}K^{-1}}$)
μ	لزجت دینامیکی ($\mathrm{Pa\ s^{-1}}$)
θ	دمای بی‌بعد
ρ	چگالی ($\mathrm{kg\ m^{-3}}$)
τ	زمان بی‌بعد
ν	لطجت سینماتیکی ($\mathrm{m^2\ s^{-1}}$)
ω	فاکتور خارج از مرکزی

زیرنویس‌ها

∞	شرایط محیط
bm	لایه مرزی جرم
c	مقدار بحرانی
eff	خواص موثر
F	سوخت
g	گاز
l	مایع
nbp	خواص در دمای جوش نرمال
r	مقدار کاهش یافته
s	سطح قطره
tot	خواص کل
v	بخار

6- مراجع

[1] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Ceniceros, M. Natarajan, Review of biodiesel composition, properties, and specifications,

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]

[19] S. Sazhin, A. Elwardany, P. Krutitskii, G. Castanet, F. Lemoine, E. Sazhina, M. Heikal, A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 21, pp. 4495-4505, 2010.

[20] M. Saeidi Neycharan, Production of biodiesel, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 24, No. 102, pp. 57-66, 2015. (in persian فارسی)

[21] M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, O. Armas, Correlation for the estimation of the density of fatty acid esters fuels and its implications. A proposed biodiesel cetane index, *Chemistry and Physics of Lipids*, Vol. 163, No. 7, pp. 720-727, 2010.

[22] K. Krisnangkura, T. Yimsuwan, R. Pairintra, An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures, *Fuel*, Vol. 85, No. 1, pp. 107-113, 2006.

[23] H. An, W. Yang, A. Maghbouli, S. Chou, K. Chua, Detailed physical properties prediction of pure methyl esters for biodiesel combustion modeling, *Applied Energy*, Vol. 102, No. 1, pp. 647-656, 2013.

[24] R. Kolodnytska, M. Al Qubeissi, S. S. Sazhin, Biodiesel fuel droplets: transport and thermodynamic properties, in *25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Crete, Greece*, 2013.

[25] G. Zhu, S. Aggarwal, Transient supercritical droplet evaporation with emphasis on the effects of equation of state, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 7, pp. 1157-1171, 2000.

[26] C. L. Yaws, *Thermophysical properties of chemicals and hydrocarbons*, pp. 1-95, New York: William Andrew, 2008.

[27] B. J. McBride, M. J. Zehe, S. Gordon, *NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species*: National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center at Lewis Field, 2002.

[28] B. J. McBride, S. Gordon, M. A. Reno., *Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species, NASA Technical Memorandum 4513*, 1993.

[29] K. K. Kuo, *Principles of combustion*, Second edition, pp. 672-673, New Jersey: Wiley, 2005.

[30] A. Daıf, M. Bouaziz, X. Chesneau, A. A. Cherif, Comparison of multicomponent fuel droplet vaporization experiments in forced convection with the Sirignano model, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 282-290, 1999.

[31] T. Kitano, J. Nishio, R. Kurose, S. Komori, Evaporation and combustion of multicomponent fuel droplets, *Fuel*, Vol. 136, No. 1, pp. 219-225, 2014.

[32] H. Kim, N. Sung, The effect of ambient pressure on the evaporation of a single droplet and a spray, *Combustion and Flame*, Vol. 135, No. 3, pp. 261-270, 2003.

[33] M. Matalon, C. K. Law, Gas-phase transient diffusion in droplet vaporization and combustion, *Combustion and Flame*, Vol. 50, No. 1, pp. 219-229, 1983.

[34] M. Al Qubeissi, S. Sazhin, J. Turner, S. Begg, C. Crua, M. Heikal, Modelling of gasoline fuel droplets heating and evaporation, *Fuel*, Vol. 159, No. 1, pp. 373-384, 2015.

[35] S. Phankosol, K. Sudaprasert, S. Lilitchan, K. Aryusuk, K. Krisnangkura, Estimation of surface tension of fatty acid methyl ester and biodiesel at different temperatures, *Fuel*, Vol. 126, No. 1, pp. 162-168, 2014.

[36] G. Yao, A film-theory-based model for a multicomponent droplet evaporation at both low-and high-pressure environments, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, No. 3, pp. 290-294, 2006.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 143-169, 2012.

[2] G. Knothe, Biodiesel and renewable diesel: a comparison, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 3, pp. 364-373, 2010.

[3] A. Hamidi, S. M. Mirsalim, B. Ghobadian, A. Parivar, S. Abdolmaleki, Effect of soybean biodiesel on performance and emissions of high-speed compression-ignition engine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 405-411, 2015. (in Persian فارسی)

[4] B. Najafi, Artificial neural networks used for the prediction of the diesel engine performance and pollution of waste cooking oil biodiesel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 11-20, 2012. (in Persian فارسی)

[5] D. Ayhan, *Biodiesel a Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*, pp. 110-120, London: Springer, 2008.

[6] F. Meisami, H. Ajam, Techno-economic analysis of diesel engine fuelled with biodiesel based on experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 301-309, 2015. (in Persian فارسی)

[7] T. Kamimoto, H. Kobayashi, Combustion processes in diesel engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 17, No. 2, pp. 163-189, 1991.

[8] K. Saha, E. Abu-Ramadan, X. Li, Multicomponent evaporation model for pure and blended biodiesel droplets in high temperature convective environment, *Applied Energy*, Vol. 93, No. 1, pp. 71-79, 2012.

[9] M. Al Qubeissi, S. S. Sazhin, C. Crua, M. R. Heikal, Modelling of Heating and Evaporation of Biodiesel Fuel Droplets, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 46-49, 2015.

[10] S. Sazhin, M. Al Qubeissi, R. Kolodnytska, A. Elwardany, R. Nasiri, M. Heikal, Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation, *Fuel*, Vol. 115, No. 1, pp. 559-572, 2014.

[11] M. Al Qubeissi, S. Sazhin, C. Crua, J. Turner, M. Heikal, Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation: Effects of fuel composition, *Fuel*, Vol. 154, No. 1, pp. 308-318, 2015.

[12] B. Abramzon, W. A. Sirignano, Droplet vaporization model for spray combustion calculation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 9, pp. 1605-1618, 1989.

[13] B. Abramzon, S. Sazhin, Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption, *Fuel*, Vol. 85, No. 1, pp. 32-46, 2006.

[14] A. Omidvar, R. Mehryar, A. H. Mahdavi, Evaluation of unit Lewis Number assumption effect on modeling of water and fuel droplets evaporation, *Fuel and Combustion*, Vol. 6, No. 1, 2013. (in Persian فارسی)

[15] G.-S. Zhu, R. D. Reitz, S. K. Aggarwal, Gas-phase unsteadiness and its influence on droplet vaporization in sub-and super-critical environments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 16, pp. 3081-3093, 2001.

[16] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, J. P. O'Connell, *The properties of gases and liquids*, Fifth edition, pp. 3.1-11.43, New York: McGraw-Hill, 2001.

[17] W. A. Sirignano, *Fluid dynamics and transport of droplets and sprays*, Second edition, pp. 53-56, New York: Cambridge University Press, 2010.

[18] S. Mitchell, M. Vynnycky, I. Gusev, S. S. Sazhin, An accurate numerical solution for the transient heating of an evaporating spherical droplet, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 217, No. 22, pp. 9219-9233, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.22.9]