

تأثیر نسبت اکسیژن به متان بر محصولات احتراق راکتور اتوترمال ریفرمینگ صنعتی

الهام آریافرد^{۱*}، علیرضا علی پور^۲، محمدرضا رحیم پور^۳، محمد فارسی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، shirazu.ac.ir.aryafard@shirazu.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، shirazu.ac.ir.alipoor@shirazu.ac.ir

۳- استاد، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، shirazu.ac.ir.rahimpour@shirazu.ac.ir

۴- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، shirazu.ac.ir.farsi@shirazu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

مخلوط هیدروژن و مونوکسید کربن با عنوان گاز سنتز به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله کاربردهای گاز سنتز می‌توان به خوراک واحدهای تولید متانول و آمونیاک در صنعت پتروشیمی اشاره کرد. روش‌های گوناگونی جهت تبدیل متان و گاز طبیعی به گاز سنتز وجود دارد که از آن جمله می‌توان به ریفرمینگ با بخار آب، اکسیداسیون جزئی، ریفرمینگ خشک و اتوترمال ریفرمینگ اشاره کرد. در فرآیند اتوترمال ریفرمینگ، واکنش‌های اکسیداسیون جزئی و ریفرمینگ با بخار آب به طور همزمان در یک راکتور اتفاق می‌افتند؛ از این رو گرمای تولیدی توسط واکنش گرمای اکسیداسیون جزئی متان در واکنش گرماگیر ریفرمینگ متان با بخار آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله عوامل تأثیرگذار بر عملکرد راکتور اتوترمال ریفرمینگ نسبت اکسیژن به متان در جریان ورودی راکتور است. در این مطالعه تأثیر نسبت اکسیژن به متان بر محصولات احتراق یک راکتور صنعتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: اکسیداسیون جزئی متان، اتوترمال ریفرمینگ، دینامیک سیالات محاسباتی، گاز سنتز

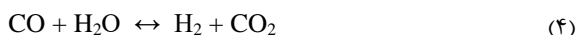
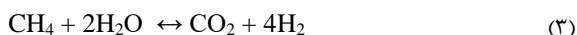
ریفرمینگ شامل دو بخش اصلی همگن و ناهمگن (بستر کاتالیستی) می‌باشد. بخش اول شامل مشعل و محفظه احتراق است. کاتالیست در فرآیند اتوترمال ریفرمینگ نقش مهمی ایفا می‌کند و از میان کاتالیست‌های مختلف نیکل به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. خوراک راکتورهای اتوترمال ریفرمینگ شامل هیدروکربن‌ها، بخار آب و اکسیدکننده است. اکسیژن به عنوان اکسیدکننده، مهم‌ترین خوراک راکتورهای اتوترمال است. نسبت اکسیژن به کربن در خوراک، بر روی دمای جریان خروجی از راکتور، ترکیب محصول و تشکیل کک در طول راکتور اثر می‌گذارد. به طور کلی افزایش مقدار اکسیژن، موجب افزایش میزان تبدیل متان و راندمان تولید هیدروژن می‌شود. خوراک دیگر راکتورهای اتوترمال ریفرمینگ بخار آب است که در واکنش‌های ریفرمینگ و جابجایی آب-گاز شرکت می‌کند. [۴].

به طور کلی در بخش احتراق راکتورهای اتوترمال ریفرمینگ واکنش اکسیداسیون جزئی مطابق واکنش ۱، و در بستر کاتالیستی واکنش‌های ریفرمینگ متان و جابجایی آب-گاز مطابق واکنش‌های ۲، ۳ و ۴ رخ می‌دهند [۵].

مقدمه

گاز سنتز متشکل از گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن یک ترکیب شیمیایی بااهمیت در صنایع پتروشیمی محسوب می‌شود. این ترکیب ارزشمند عمدتاً در واحدهای تولید متانول، آمونیاک و اوره مورد استفاده قرار می‌گیرد. گاز سنتز محصول فرآیندهای ریفرمینگ با بخار^۱، ریفرمینگ خشک^۲، اکسیداسیون جزئی^۳ و اتوترمال ریفرمینگ^۴ می‌باشد. خوراک اصلی فرآیندهای تولید گاز سنتز در صنعت گاز طبیعی یا متان است. تفاوت روش‌های مختلف تولید گاز سنتز در اکسیدکننده مورد استفاده، نسبت هیدروژن به مونوکسید کربن در محصولات، و سینتیک واکنش‌ها می‌باشد [۱].

اتوترمال ریفرمینگ ترکیبی از ریفرمینگ با بخار و اکسیداسیون جزئی است. از دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ تاکنون این روش در تولید گاز سنتز واحدهای تولید متانول و آمونیاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مشخصه این فرآیند جذب گرمای حاصل از اکسیداسیون جزئی توسط ریفرمینگ با بخار است که منجر به ایجاد فرآیندی خنثی به لحاظ گرمایی می‌شود؛ از این رو نیاز به تامین انرژی از منابع خارجی ندارد. همچنین با به کارگیری بخار تشکیل کک در اکسیداسیون جزئی کاهش می‌یابد [۲]. از دیگر مزایای ریفرم اتوترمال می‌توان به سایز کوچک و پاسخ سریع این راکتور اشاره کرد. بنابراین ریفرمینگ اتوترمال نسبت به فرآیند گرماگیر ریفرمینگ با بخار و فرآیند گرماده اکسیداسیون جزئی برتری دارد [۳]. راکتور اتوترمال



شبیه‌سازی

با توجه به متقارن بودن هندسه راکتور اتوترمال ریفرمینگ یک هندسه دوبعدی متقارن محوری به منظور حل معادلات بقا در نظر گرفته شده است. در حالت پایا، معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات بقا جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌های شیمیایی می‌باشد که به ترتیب در معادلات ۱ تا ۵ آورده شده‌اند.

معادله پیوستگی که بیان کننده بقای جرم است به صورت معادله (۱) گزارش می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله بقا مومنتوم با صرف نظر کردن از نیروهای حجمی به صورت زیر است:

³ partial oxidation

⁴ autothermal reforming

¹ steam reforming

² dry reforming

قطر برخورد، σ_{ij} در رابطه ضریب نفوذ مخلوط دوتایی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_j) \quad (12)$$

ناحیه متخلخل

در راکتورهای صنعتی اتوترمال ریفرمینگ یک ناحیه ناهمگن کاتالیستی در امتداد ناحیه احتراقی وجود دارد. برخورد جریان خروجی از محفظه احتراق با ناحیه متخلخل منجر به چرخش جریان در محفظه احتراق می‌شود. چرخش جریان بر کیفیت احتراق، توزیع دما و توزیع گونه‌ها تأثیرگذار است. از این رو در این مطالعه، بستر کاتالیستی به صورت یک ناحیه متخلخل بدون واکنش‌های ریفرمینگ در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه افت فشار در ناحیه متخلخل از معادله مناسب بسترهای پر شده، ارگان^۱ به صورت رابطه (۱۳) استفاده شده است [۶].

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu}{D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} u_\infty + \frac{1.75\rho}{D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} u_\infty^2 \quad (13)$$

که در آن u_∞ ، ε ، D_p ، L ، Δp به ترتیب نشان دهنده افت فشار درون ناحیه متخلخل، طول ناحیه متخلخل، قطر ذرات موجود در بستر، تخلخل بستر، و سرعت ظاهری سیال می‌باشد. پارامترهای موردنیاز برای شبیه سازی ناحیه متخلخل ضرایب مقاومت ویسکوز و مقاومت اینرسی است که با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$\alpha = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (15)$$

سینتیک واکنش شیمیایی

به طور کلی شبیه سازی اکسیداسیون جزئی متان با استفاده از مکانیسم‌های جزئی شیمیایی یا واکنش‌های کلی کاهش یافته انجام می‌شود. مکانیسم‌های جزئی شامل تعداد زیادی واکنش ابتدایی و گونه‌های رادیکالی می‌باشد. به کارگیری مکانیسم‌های جزئی در شبیه سازی راکتور اتوترمال ریفرمینگ صنعتی که شامل دو بخش مجزا ناحیه احتراقی همگن و ناحیه ریفرمینگ ناهمگن می‌باشد ممکن است منجر به تولید نتایج با دقت پایین در ناحیه کاتالیستی شود. به علاوه هزینه محاسباتی استفاده از مکانیسم‌های جزئی بسیار بیشتر از واکنش‌های کلی می‌باشد. یکی از مکانیسم‌های کلی موجود در مطالعه اکسیداسیون جزئی متان مکانیسم Jones and Lindstedt با نام اختصاری JL است که در شبیه سازی شعله‌های آشفته و کاربردهای صنعتی دارای دقت قابل قبولی می‌باشد [۷]. این مکانیسم بسیار ساده جهت تخمین دما و پروفایل تغییر مونوکسید کربن در شبیه سازی نمونه‌های صنعتی مورد توجه است. از این رو در این مطالعه از مکانیسم JL شامل ۶ گونه شیمیایی و ۴ واکنش گازی به منظور محاسبات جریان‌های واکنشی به کار استفاده شده است.

به منظور محاسبات تقابل آشفته‌گی و شیمی احتراق از مدل Eddy-Dissipation-Concept (EDC) با پارامترهای پیش فرض استفاده شده است؛ و واکنش‌های حجمی به فرمت کمکین^۳ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر اساس اطلاعات صنعتی جریان‌های خوراک ورودی به راکتور،

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن ρ ، u ، p ، τ به ترتیب دانسیته، بردار سرعت، فشار استاتیکی و تنشور تنش می‌باشد. تنشور تنش به صورت معادله (۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی است.

مقاله بقا انرژی به صورت معادله (۴) ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{k=1}^N h_k J_{ij}) + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_h \quad (4)$$

که در آن h و λ به ترتیب نشان دهنده آنتالپی و نفوذ حرارتی هستند. همچنین S_h نشان دهنده گرمای واکنش‌های شیمیایی است.

معادله بقای گونه برای آمین گونه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x_i}) + S_i \quad (5)$$

که در آن $D_{i,m}$ ضریب نفوذ آمین گونه در مخلوط، و S_i نرخ خالص تولید آمین گونه در واکنش‌های شیمیایی می‌باشد.

از آنجایی که دما و ترکیب مخلوط گازی در راکتور تغییر می‌کند خواص فیزیکی مخلوط گازی نیز تغییر می‌کند.

دانسیته سیال با استفاده از معادله گاز ایده آل برای مخلوط‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho = \frac{p M_{w,mix}}{R T} \quad (6)$$

که در آن $M_{w,mix}$ جرم مولکولی مخلوط است و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$M_{w,mix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{M_{w,i}}} = \sum_{i=1}^N X_i M_{w,i} \quad (7)$$

ظرفیت گرمایی مخلوط گازی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$C_p = \sum_i Y_i C_{p,i} \quad (8)$$

ضریب نفوذ جرمی موثر به صورت رابطه (۹) است.

$$D_{eff,i} = \frac{1-x_i}{\sum_{j \neq i} x_j / D_{ij}} \quad (9)$$

که در آن D_{ij} ضریب نفوذ در مخلوط دوتایی است و از تئوری Chapman-Enskog برای سینتیک مولکولی و رابطه مخلوط گازها از معادله (۱۰) بدست می‌آید:

$$D_{ij} = 0.00188 \sqrt{\frac{T^3}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \left(\frac{1}{M_{w,i}} + \frac{1}{M_{w,j}} \right)} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) Ω_D نشان دهنده انتگرال نفوذی برخورد است و تابعی از دما و انرژی لنارد-جونز^۱ است.

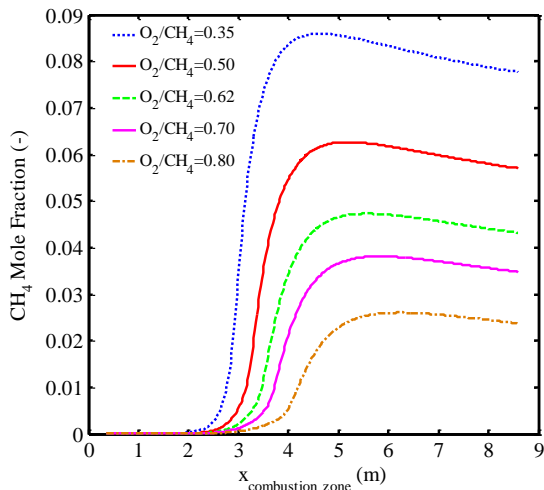
$$\Omega_D = f \left(\frac{T}{\sqrt{(\varepsilon/k_B)_i (\varepsilon/k_B)_j}} \right) \quad (11)$$

که در آن ε_i و ε_j نشان دهنده انرژی لنارد-جونز، و k_B ثابت بولتزمن است.

³ CHEMKIN

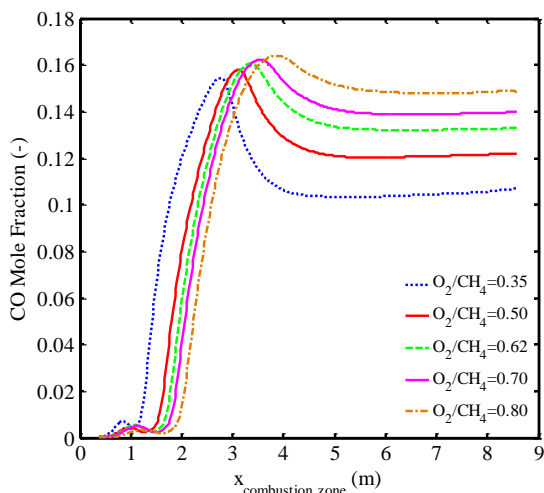
¹ Lennard-Jones
² Ergun

افزایش غلظت اکسیژن در محیط واکنش منجر به مصرف شدن مقدار بیشتری متان در واکنش اکسیداسیون جزئی می‌شود. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت اکسیژن به متان از ۰/۳۵ تا ۰/۸۰ کسر مولی متان در طول محفظه احتراق کاهش می‌یابد به گونه‌ای که کسر مولی متان در انتهای محفظه احتراق از ۰/۰۷۴ تا ۰/۰۲۱ تغییر می‌کند. از این رو هنگامی که مقدار اکسیژن در جریان ورودی به راکتور افزایش می‌یابد میزان تبدیل متان افزایش می‌یابد.



شکل ۲: تاثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر کسر مولی متان در طول محفظه احتراق

شکل ۳ تغییرات کسر مولی مونوکسید کربن در طول محفظه احتراق با تغییر نسبت مولی اکسیژن به کربن را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت اکسیژن به متان از ۰/۳۵ تا ۰/۸۰ مقدار کسر مولی مونوکسید کربن به عنوان محصول احتراق افزایش می‌یابد و از ۰/۱۰۸ تا ۰/۱۵ تغییر می‌کند.



شکل ۳: تاثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر کسر مولی مونوکسید کربن در طول محفظه احتراق

شکل ۴ روند تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن با تغییر نسبت مولی اکسیژن به متان در طول راکتور اتوترمال ریفرمینگ نشان می‌دهد. بر اساس واکنش جابجایی آب-گاز با افزایش نسبت اکسیژن به متان کسر مولی دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

رژیم جریان‌ها آشفته هستند از این رو مدل استاندارد k-ε جهت محاسبه انرژی جنبشی آشفتنگی و نرخ اتلاف گردابه‌ای انتخاب شده است.

شرایط مرزی

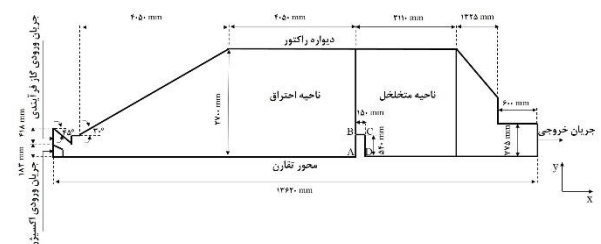
شرایط مرزی برای جریان‌های ورودی به راکتور سرعت ورودی^۱ و برای جریان خروجی فشار خروجی^۲ انتخاب شده‌اند. همچنین جریان روی دیواره راکتور از شرط عدم لغزش پیروی می‌کند و در تماس با هوای محیط با دمای ۲۷ °C و ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲۰ W m⁻² K⁻¹ در نظر گرفته شده است.

روش حل

مدل جریان واکنشی تعریف شده برای راکتور صنعتی اتوترمال ریفرمینگ با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت حل شد. معادلات غیر خطی کوپل شده حاکم بر مسئله با استفاده از روش حجم محدود حل و از الگوریتم سیمپل^۳ برای کوپلینگ معادلات سرعت و فشار استفاده شد.

نتایج

در این مطالعه تنها مشعل و ناحیه احتراقی راکتور اتوترمال ریفرمینگ شبیه‌سازی شده است. از این رو واکنش‌های ریفرمینگ بخار در بستر کاتالیستی لحاظ نشده است. گرچه به منظور اعمال سایر عوامل تاثیرگذار بستر کاتالیستی بر هیدرودینامیک و چرخش سیال در ناحیه احتراقی، بستر کاتالیستی به صورت یک ناحیه متخلخل بدون واکنش شیمیایی در نظر گرفته شده است. هندسه دو بعدی متقارن محوری ترسیم شده که شامل بخش‌های اصلی مشعل غیر پیش آمیخته، محفظه احتراق، و ناحیه متخلخل در یک راکتور اتوترمال ریفرمینگ هستند در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در راکتورهای صنعتی اتوترمال ریفرمینگ یه لایه کاشی با مقاومت حرارتی بالا بر روی بستر کاتالیستی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس اطلاعات صنعتی ۲۰٪ از کاشی‌های مرکز این لایه به صورت غیرمتخلخل تعبیه شده‌اند تا از بستر کاتالیستی در برابر جریان داغ با سرعت بالا شعله محافظت کند و به چرخش جریان در محفظه احتراق کمک کند. در این شبیه‌سازی کاشی‌های غیرمتخلخل به صورت یک دیواره در نظر گرفته شده است که در شکل ۱ "ABCD" نامگذاری شده است.



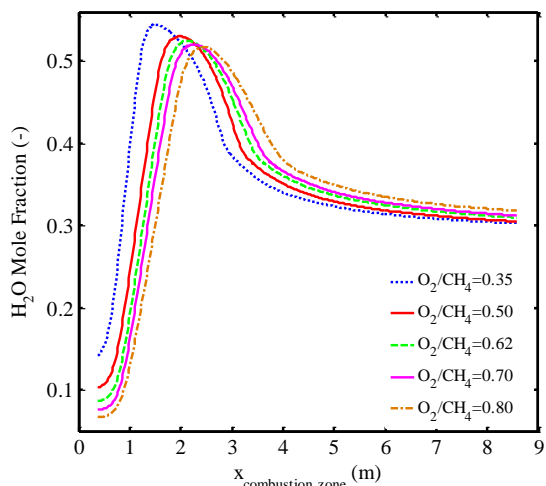
شکل ۱: هندسه شبیه‌سازی شده

بحث بر روی نتایج

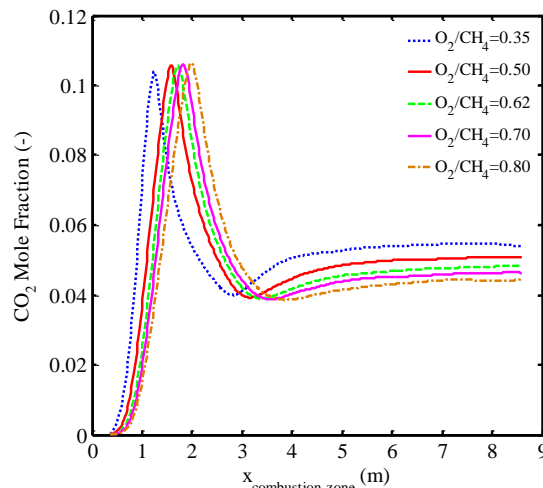
اثر نسبت مولی اکسیژن به متان در بازه ۰/۳۵-۰/۸۰ بر روی کسر مولی گونه‌های حاضر در محیط واکنش (متان، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن و آب) در طول محفظه احتراق مورد مطالعه قرار گرفت؛ و نتایج بر روی محور تقارن هندسه شبیه‌سازی شده گزارش شد.

³ SIMPLE

¹ velocity inlet
² pressure outlet



شکل ۳: تاثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر کسر مولی آب در طول محفظه احتراق



شکل ۴: تاثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر کسر مولی دی‌اکسید کربن در طول محفظه احتراق

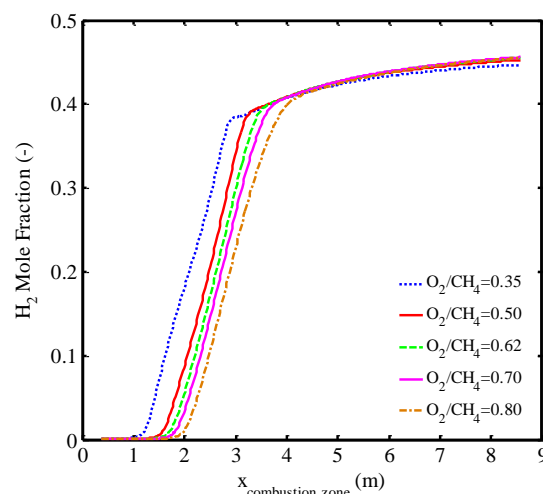
نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر گونه‌های موجود در ناحیه احتراقی یک راکتور اتوترمال ریفرمینگ صنعتی با بکارگیری مکانیسم کلی JL مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نسبت مولی اکسیژن به متان در بازه ۰/۳۵-۰/۸۰ تغییر داده شد و نمودارهای کسر مولی متان، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن و آب بر روی محور تقارن هندسه مورد مطالعه ترسیم شد. نتایج حاصل حاکی از آن بود که با افزایش نسبت مولی اکسیژن به متان در خوراک ورودی به راکتور کسر مولی متان کاهش و میزان تبدیل آن افزایش می‌یابد. همچنین کسر مولی مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن به ترتیب روند افزایشی و کاهشی دارند. بعلاوه کسر مولی هیدروژن و آب خروجی از محفظه احتراق تغییرات قابل توجهی ندارند.

فهرست علائم

C	غلظت، mol.m^{-3}
$D_{i,m}$	نفوذ گونه نام در مخلوط، $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
D_p	قطر ذره، m
h	انتالپی، J.kg^{-1}
J_{ij}	فلاکس نفوذی گونه نام، $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
k_B	ثابت بولتزمن
k_{eff}	ضریب هدایت موثر، $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
L	طول، m
Mw	جرم مولکولی، g.mol^{-1}
p	فشار، Pa
R	ثابت جهانی گازها، $\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
T	دما، K
u	سرعت، m.s^{-1}
u_{∞}	سرعت ظاهری، m.s^{-1}
X_i	کسر مولی گونه i

با توجه به مکانیسم در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی گونه هیدروژن از یک سو به عنوان واکنش دهنده با اکسیژن واکنش داده و آب تولید می‌کند و از سوی دیگر محصول واکنش‌های ریفرمینگ غیر کاتالیستی و اکسیداسیون جزئی متان است. از این رو همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود افزایش نسبت اکسیژن به متان در جریان خوراک به راکتور تأثیر قابل توجهی بر کسر مولی هیدروژن در ناحیه احتراقی ندارد.



شکل ۵: تاثیر نسبت مولی اکسیژن به متان بر کسر مولی هیدروژن در طول محفظه احتراق

غلظت آب موجود در محیط واکنش متاثر از واکنش‌های هیدروژن با اکسیژن و واکنش همگن جابجایی گاز-آب است. با افزایش میزان اکسیژن در جریان خوراک ورودی به راکتور هیدروژن بیشتری با اکسیژن واکنش می‌دهد که منجر به تولید بیشتر آب می‌شود و از سوی دیگر آب موجود در محیط در واکنش جابجایی گاز-آب مصرف می‌شود. شکل ۶ اثر افزایش نسبت اکسیژن به متان بر کسر مولی آب در طول محفظه احتراق را نشان می‌دهد؛ که با افزایش این نسبت کسر مولی آب خروجی از محفظه احتراق اندکی افزایش می‌یابد.

Y_i	کسر جرمی گونه i
	فهرست علائم یونانی
α	ضریب مقاومت ویسکوز در محیط متخلخل، m^{-2}
β	ضریب مقاومت اینرسی در محیط متخلخل، m^{-1}
ρ	دانسیتته، $kg.m^{-3}$
μ	ویسکوزیته دینامیک، Pa.s
ε	تخلخل بستر
$\varepsilon_i, \varepsilon_j$	انرژی لنارد-جونز
λ	نفوذ حرارتی، $m^2.s^{-1}$
σ_{ij}	قطر برخورد، Å
τ_{ij}	تنسور تنش، Pa
Ω_D	انتگرال برخورد

مراجع

- 1- D. Pakhare and J. Spivey, A review of dry (CO₂) reforming of methane over noble metal catalysts. *Chemical Society Reviews*, 2014. 43(22): p. 7813-7837.
- 2- S. Albonetti, S. Perathoner and E.A. Quadrelli, *Horizons in Sustainable Industrial Chemistry and Catalysis*. 2019: Elsevier.
- 3- S. Rowshanzamir, S. Safdarnejad and M. Eikani, A CFD model for methane autothermal reforming on Ru/ γ -Al₂O₃ catalyst. *Procedia Engineering*, 2012. 42: p. 2-24.
- 4- S. Agahzamin, A. Mirvakili and M. Rahimpour, Investigation and recovery of purge gas streams to enhance synthesis gas production in a mega methanol complex. *Journal of CO₂ Utilization*, 2016. 16: p. 157-168.
- 5- M. Kayfeci, A. Keçebaş and M. Bayat, Hydrogen production, in *Solar Hydrogen Production*. 2019, Elsevier. p. 45-83.
- 6- S. Ergun and A.A. Orning, Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1949. 41(6): p. 1179-1184.
- 7- A. Frassoldati, A. Cuoci, T. Faravelli, E. Ranzi, C. Candusso and D. Tolazzi. Simplified kinetic schemes for oxy-fuel combustion. in *1st International conference on sustainable fossil fuels for future energy*. 2009.