

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی

مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها

اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

مطالعه کاهش بار آلودگی NO خروجی از واحد اسید نیتریک توسط NH_3 روی کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$

داریوش مولاو جعفر قاجار

مرکز تحقیقات محیط زیست در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی

دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

dmowla@shirazu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، فرایند احیاء کاتالیستی انتخابی (SCR) اکسید نیتریک خروجی از واحد تولید اسید نیتریک توسط آمونیاک در حضور اکسیژن روی کاتالیست اکسید وانادیم بر پایه سیلیس در راکتورهای با بستر ثابت و سیالی مورد بررسی قرار گرفته و دو مدل ریاضی مختلف برای این نوع راکتورها پیشنهاد شده است. با حل مدل‌های ارائه شده، پروفایل غلظت در طول راکتورها در شرایط عملیاتی مختلف مشخص می‌گردد. برای ارزیابی دقت مدل‌های پیشنهادی، یک دستگاه آزمایشگاهی در مقیاس نیمه صنعتی ساخته شد. داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده با مقادیر بدست آمده از مدلها مقایسه گردید و مشاهده شد که تطابق خوبی بین آنها برقرار است. با توجه به دقت مطلوب مدل‌های ارائه شده، از آنها برای مطالعه اثر پارامترهای مختلف نظیر دمای گاز ورودی، غلظت NO و O_2 در خوراک و سرعت پر شدن (GHSV) بر روی میزان تبدیل NO در کاهش میزان آلودگی گازهای خروجی از واحدهای تولید اسید نیتریک استفاده گردید. نتایج بدست آمده برای کاتالیست مورد استفاده نشان داد که حداکثر میزان تبدیل NO در دماهای 300°C - 280°C ، GHSV کوچکتر از 2000 h^{-1} STP و غلظت O_2 بزرگتر از ۱۵٪ برای راکتور با بستر ثابت و ۱۰٪ برای راکتور با بستر سیالی رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده به وضوح پتانسیل بالای کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ را برای کنترل انتشار گاز NO از دودکش منابع مختلف در مقیاس صنعتی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: SCR، NO، کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ ، مدل ریاضی، واحد اسید نیتریک

۱- مقدمه

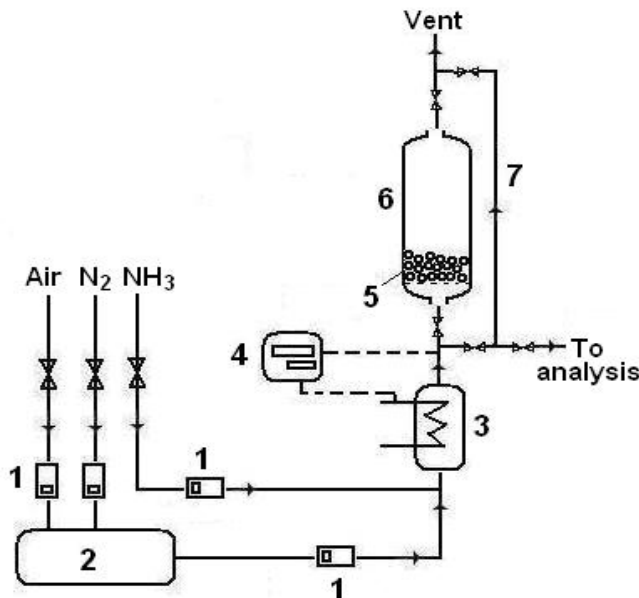
احیاء کاتالیستی انتخابی (SCR) اکسیدهای نیتروژن توسط آمونیاک، یکی از مؤثرترین روشها جهت کاهش آلایندة NO_x از گازهای خروجی از منابع مختلف نظیر نیروگاهها و واحدهای تولید اسید نیتریک به شمار می رود که به طور گسترده در جهان از آن استفاده می شود. این روش یک فن آوری بسیار معمول و به خوبی توسعه یافته در محدوده دمایی $250-500^\circ\text{C}$ با بازده بیش از ۹۰٪ محسوب می شود [۴-۱]. اساس کار روش SCR، احیاء NO_x (مخلوط NO و NO_2) توسط یک ماده احیاءکننده (غالباً NH_3) در حضور کاتالیست مناسب (غالباً V_2O_5) است. متداولترین کاتالیست در صنعت، $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ به شمار می رود که در یک محدوده دمایی خاص و در حضور اکسیژن به جای اکسید کردن NO ، آن را توسط آمونیاک به نیتروژن و بخار آب تبدیل می کند [۵ و ۶]. ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی و واکنش پذیری این کاتالیست به طور گسترده توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱ و ۷]. مشخص شده است که برای فرایند SCR، کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ در دماهای بالاتر از 350°C بسیار فعال است ولی در کاربردهای صنعتی مشکلاتی از جمله فقدان مقاومت در برابر ساییدگی و قیمت بالا دارد [۸]. همچنین در صورتی که گاز حاوی SO_2 باشد بعلاوه رسوب بیسولفات آمونیوم و تشکیل گونه های غیر فعال سولفات وانادیم، کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ غیر فعال می شود [۹]. در مورد فرایند SCR، توجه کمتری به کاتالیستهای دیگر از جمله کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ شده است. SiO_2 در محیطهای اسیدی بسیار پایدار است و اکسید وانادیم بر پایه این ماده دارای فعالیت قابل توجه جهت احیاء NO_x در دماهای نزدیک به 290°C است و قیمت آن نیز در مقایسه با کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ بسیار پایین می باشد [۹].

در این تحقیق، احیاء کاتالیستی انتخابی آلایندة اکسید نیتریک (NO) توسط آمونیاک در راکتورهای با بستر ثابت و سیالی که حاوی کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ می باشد مورد بررسی قرار گرفته است. دو مدل ریاضی مختلف جهت پیش بینی تغییرات میزان تبدیل (conversion) اکسید نیتریک در طول این نوع راکتور ارائه شده است. به منظور بررسی اعتبار مدلها ارائه شده، یک دستگاه آزمایشگاهی در مقیاس نیمه صنعتی ساخته شد و نتایج مدلها با داده های آزمایشگاهی بدست آمده مقایسه گردید. همچنین از مدلها پیشنهادی جهت مطالعه اثر پارامترهای عملیاتی مختلف بر میزان تبدیل NO در خروجی از راکتور استفاده گردید.

۲- دستگاه آزمایشگاهی

شکل ۱ نمودار شماتیک دستگاه ساخته شده را نشان می دهد. این دستگاه شامل یک قسمت پیش گرمکن به ارتفاع ۸۰ cm با دو کوئل ضخیم گرم کننده می باشد. یک مخلوط گازی شامل هوا، نیتروژن و آمونیاک به درون قسمت پیش گرمکن فرستاده می شود که در آنجا قسمتی از آمونیاک اکسید شده و NO_x ایجاد می شود. دبی جریانهای مختلف توسط روماترها طوری تنظیم می شود که یک خوراک گازی با ترکیب $100-2400$ ppm NO_x ، $2-3/6\%$ NH_3 ، $1-21\%$ O_2 و بقیه N_2 ساخته شود. به منظور ثابت نگه داشتن دمای خوراک گازی، از یک ترموکنترلر (Atbin Co., model R2 Sinus PT100, Iran) استفاده گردید. خوراک گازی به راکتورهایی که از جنس شیشه پیرکس ساخته و با پشم شیشه عایق بندی شده است وارد گردید. مشخصات راکتورهای به کار گرفته شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

غلظت گاز NO_x در ورودی و خروجی راکتورها توسط دستگاه آنالیز دیجیتال گاز دودکش (Testo Co., model 350, Germany) اندازه گیری شد. آنالیز گاز نشان داد که به طور متوسط در حدود 5% NO_x از NO_2 تشکیل شده است لذا گاز



شکل ۱- شکل شماتیک دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده؛ ۱- روتامتر؛ ۲- محفظه اختلاط؛

۳- گرمکن؛ ۴- کنترلر دما؛ ۵ بستر کاتالیست؛ ۶ راکتور؛ ۷- لوله کنارگذر

جدول ۱- خصوصیات راکتورهای کاتالیستی ساخته شده

نوع بستر	قطر داخلی (m)	قطر متوسط ذرات (m)	ارتفاع بستر (m)	وزن کاتالیست (kg)	تخلخل بستر (%)
ثابت	۰/۰۴۸	۰/۰۰۳۱	۰/۲۱	۰/۲۲۶	۵۳
سیالی	۰/۰۱۸	۰/۰۰۱۷	۰/۱۴۵ ^۱	۰/۰۲	۴۸ ^۲

^۱ ارتفاع بستر استاتیک؛ ^۲ تخلخل بستر در حداقل سیالیت

NO_x عمدتاً شامل NO می باشد. کاتالیست مورد استفاده در این تحقیق، V₂O₅/SiO₂ شامل ۷-۱۰٪ V₂O₅ و ۶۰-۸۰٪ SiO₂ (چگالی بالک ۱/۳۳ g/cm³، تخلخل ذره ۱۶٪ و حجم حفرات ۱/۴۸ cm³/g) با اندازه های مختلف می باشد.

۳- سینتیک واکنش SCR

مطالعات گوناگون نشان داده است که واکنش احیاء انتخابی NO روی کاتالیستهای اکسید فلزی، واکنشی موسوم به واکنش استاندارد SCR موسوم است [۱۰]:



مطالعات زیادی در مورد سینتیک و مکانیزم واکنش ۱ روی کاتالیستهای اکسید فلزی صورت گرفته است. در شرایط معمول واکنش SCR، مکانیزم Eley-Rideal به خوبی می تواند سینتیک واکنش احیاء NO بر روی کاتالیستهای بر اساس V₂O₅ را توضیح دهد [۱۱]. این مکانیزم شامل واکنش بین آمونیاک به شدت جذب شده روی سطح کاتالیست با NO در فاز گاز است. در این حالت مرتبه واکنش نسبت به NO برابر ۱ است. در صورتی که سطح کاتالیست به طور کامل توسط آمونیاک پوشیده شود مرتبه واکنش نسبت به NH₃ برابر صفر می باشد [۱۰]. هنگامی که T > ۳۵۰ °C و NH₃/NO > ۱ باشد پوشیده شدن سطح کاتالیست با NH₃ تضمین می شود لذا در این تحقیق، معادله زیر، به عنوان معادله سرعت واکنش ۱ در نظر گرفته می شود:

$$r_{NO} = k_{ER} C_{NO} \frac{K_{O_2} P_{O_2}}{1 + K_{O_2} P_{O_2}} \quad (2)$$

در این معادله، r_{NO} سرعت ذاتی واکنش، k_{ER} ثابت واکنش، C_{NO} غلظت NO، K_{O_2} ثابت تعادل جذب O_2 و P_{O_2} فشار جزئی O_2 می باشد.

۴- مدل سازی ریاضی

راکتور بستر ثابت به صورت یک راکتور جریان plug آدیاباتیک با فرضیات جریان پایا، پخش ناچیز جرم و گرما در جهت محوری و شعاعی، تغییر حجم ناچیز در طی واکنش بعثت غلظت بسیار کم NO و غلظت و دمای یکنواخت در جهت شعاع در نظر گرفته شده است که در این صورت معادلات موازنه جرم و انرژی عبارت است از:

$$\frac{dx_{NO}}{dz} = \frac{\rho_b}{uC_{NO,0}} (r_{NO})_{obs} \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\rho_b}{\rho_g u c_p} (r_{NO})_{obs} \Delta H_R \quad (4)$$

با شرایط اولیه: در $z = 0$ و $x_{NO} = 0$ و $T = T_0$. در معادلات ۳ و ۴، x_{NO} میزان تبدیل NO، T دما، ρ_b و ρ_g به ترتیب چگالی بستر و گاز، $C_{NO,0}$ غلظت NO در ورود به بستر، u سرعت گاز، c_p ظرفیت گرمایی گاز، ΔH_R گرمای واکنش است. همچنین $(r_{NO})_{obs}$ سرعت مشاهده شده واکنش می باشد که شامل اثرات انتقال جرم داخلی و خارجی است. برای بررسی میزان اثر انتقال جرم خارجی می توان از عدد Mear استفاده کرد [۱۲]:

$$\Phi_M = \frac{(r_{NO})_{obs} \rho_b r_p n}{k_m C_{NO,bulk}} \quad (5)$$

در این معادله، Φ_M عدد Mear، r_p شعاع ذره کاتالیست، n مرتبه واکنش و $C_{NO,bulk}$ غلظت NO در توده گاز است. در ضمن، k_m ضریب انتقال جرم می باشد که می توان آن را از معادله زیر محاسبه کرد [۱۳]:

$$\frac{k_m \rho_g}{G} \left(\frac{\mu}{\rho_g D} \right)^{2/3} = \frac{0.458}{\varepsilon_b} \left(\frac{d_p G}{\mu} \right)^{-0.407} \quad \text{for } dpG/\mu > 10 \quad (6)$$

در معادله ۶، G شار جرمی ظاهری گاز، μ ویسکوزیته گاز، D ضریب نفوذ، d_p قطر ذره کاتالیست و ε_b تخلخل بستر می باشد. در صورتی که $\Phi_M > 0.15$ باشد که در خیلی از کاربردهای صنعتی چنین است بین توده جریان گاز و سطح خارجی کاتالیت گرادیان غلظت وجود ندارد و می توان از انتقال جرم خارجی صرف نظر کرد [۱۲]. برای در نظر گرفتن نفوذ داخلی جرم در ذرات کاتالیست از ضریب مؤثر بودن (effectiveness factor) استفاده می شود که برای ذرات کروی از معادله معروف Thiele محاسبه می شود [۱۳]:

$$\eta = \frac{1}{\phi} \left[\frac{1}{\text{tgh}(3\phi)} - \frac{1}{3\phi} \right] \quad (7)$$

در این معادله، η ضریب مؤثر بودن و ϕ مادل Thiele است که از معادله زیر محاسبه می شود.

$$\phi = \frac{d_p}{6} \sqrt{\frac{k_{ER} \frac{K_{O_2} P_{O_2}}{1 + K_{O_2} P_{O_2}} \rho_p}{D_{NO,e}}} \quad (8)$$

در معادله ۸، ρ_p چگالی ذره کاتالیست و $D_{NO,e}$ ضریب نفوذ مؤثر است که از رابطه زیر تخمین زده می شود [۱۳]

$$D_{NO,e} = D_{NO} \varepsilon_p^2 \quad (9)$$

که در این معادله، ε_p تخلخل ذره کاتالیست می باشد. از آن جایکه آزمایشات در شرایط $L/d_p > 30$ و $d_t/d_p > 10$ انجام می شود پخش محوری و شعاعی جرم و حرارت قابل صرف نظر کردن است [۱۴] لذا شرط جریان plug در بستر ثابت برقرار می باشد.

بر اساس تئوری دو فازی بسترهای سیالی یک مدل ریاضی برای راکتور بستر سیالی پیشنهاد شده است. با فرض جریان plug در فازهای حباب و امولسیون، انجام واکنش تنها در فاز حباب، ناچیز بودن پخش محوری و شعاعی جرم، غلظت یکنواخت در جهت شعاع، فرایند پایا و همدم، معادله موازنه جرم برای فاز حباب و امولسیون به صورت زیر نوشته می شود:

$$u_b \frac{dC_{NO,b}}{dz} + k_m a_b (C_{NO,b} - C_{NO,e}) = 0 \quad (10)$$

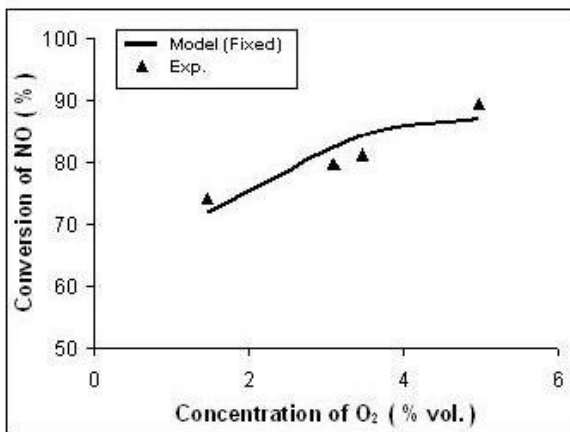
$$u_e \frac{dC_{NO,e}}{dz} + k_m a_b (C_{NO,e} - C_{NO,b}) + (1 - \delta) \rho_e (r_{NO})_{obs} = 0 \quad (11)$$

با شرایط اولیه: در $z = 0$ ، $C_{NO,b} = C_{NO,0}$ و $C_{NO,e} = C_{NO,0}$. در معادلات ۱۰ و ۱۱، u_b و u_e به ترتیب سرعت فاز حباب و فاز امولسیون، $C_{NO,b}$ و $C_{NO,e}$ به ترتیب غلظت NO در فاز حباب و فاز امولسیون، a_b سطح مخصوص حبابها در واحد حجم بستر، δ_e کسری از بستر که از حباب تشکیل شده و ρ_e چگالی فاز امولسیون می باشد. از میان پارامترهای مدل‌های ارائه شده، سرعت واکنش از کار قبلی انجام شده توسط محققین این مقاله استفاده شده است [۹ و ۱۵]. سایر پارامترها نظیر گرمای ویژه، گرمای واکنش و پارامترهای مدل دوفازی بسترهای سیالی از مراجع استاندارد استفاده شده است [۱۶ و ۱۷]. یک برنامه کامپیوتری برای حل معادلات دیفرانسیل مبین مدل راکتور بستر ثابت (معادلات ۳ و ۴) و مدل بستر سیالی (معادلات ۱۰ و ۱۱) با استفاده از تفاوت محدود نوشته شده است [۹].

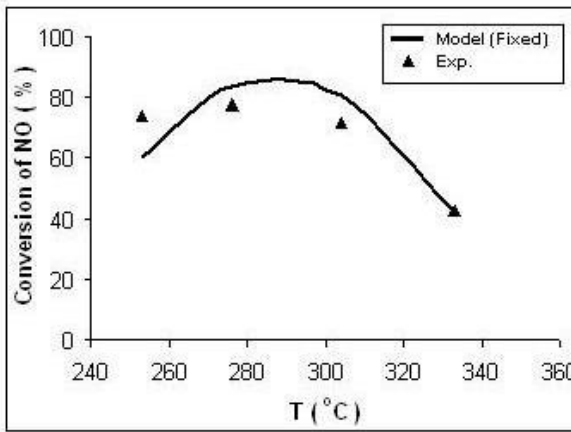
۵- یافته ها و بحث

۵-۱- مقایسه نتایج مدل‌های ارائه شده و داده های آزمایشگاهی بدست آمده

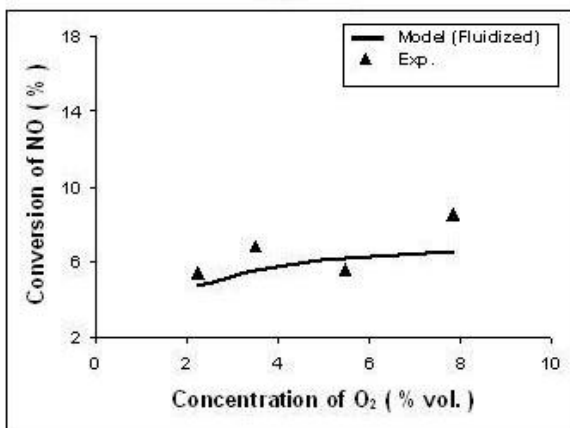
شکل ۲ نتایج مدل‌های ارائه شده و داده های آزمایشگاهی بدست آمده از میزان تبدیل NO در خروجی راکتورها بر حسب دما و غلظت O_2 ورودی نشان می دهد. مقادیر خطای نسبی برای شکل ۲ الف تا ت به ترتیب ۱۰/۱، ۳/۴، ۱۲/۳ و ۱۶/۲ می باشد. به علت کثرت پارامترهای مدل راکتور بستر سیالی که بایستی از معادلات مختلف محاسبه شوند میزان خطا در این مورد بالاتر است. همانطور که از شکل ۲ مشخص است تطابق خوبی بین نتایج مدلها و داده های آزمایشگاهی برقرار است. این مطلب توانایی کلی مدل را برای پیش بینی اثر پارامترهای مختلف بر میزان تبدیل NO نشان می دهد.



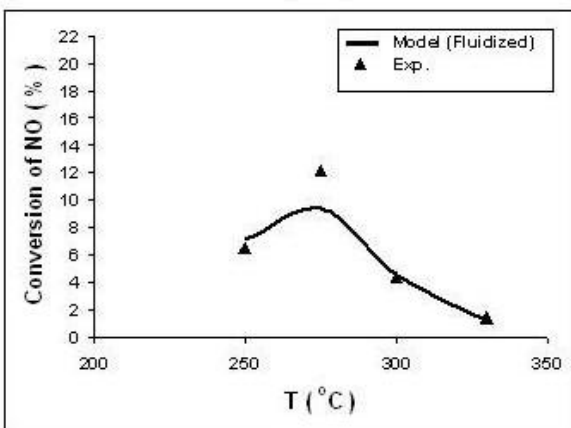
(ب)



(الف)



(ت)

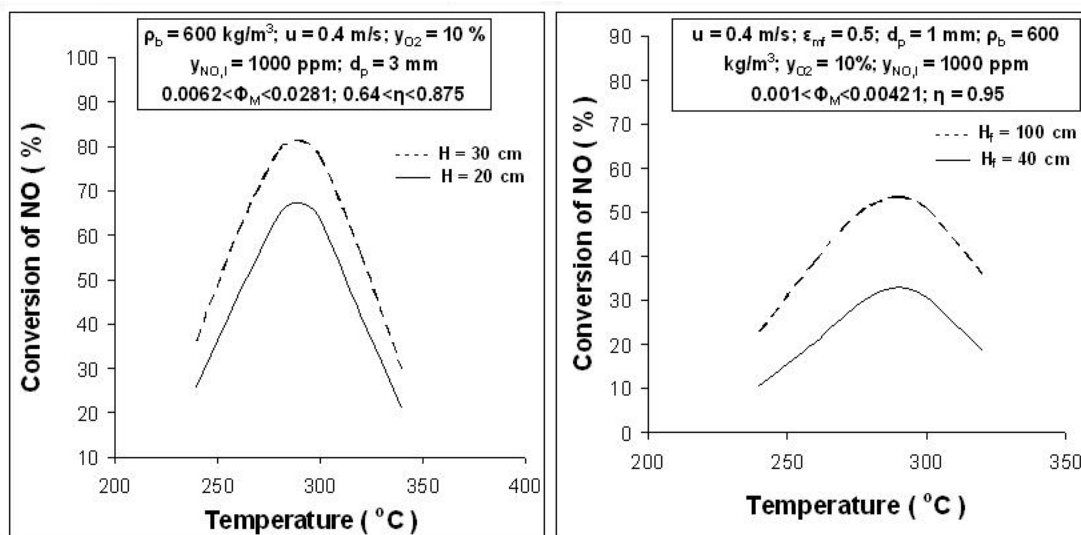


(ب)

شکل ۲- مقایسه نتایج مدل‌های ارائه شده و داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده

۲-۵- اثر دمای خوراک بر میزان تبدیل NO

تأثیر دمای خوراک بر میزان تبدیل NO در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، میزان تبدیل NO با افزایش دما افزایش یافته تا در دمای تقریبی 286°C برای راکتور بستر ثابت و 290°C برای راکتور بستر سیالی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. دمای متناظر با حداکثر میزان تبدیل برای کاتالیست مورد مطالعه و سایر کاتالیست‌های SCR در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، دمای بهینه فرایند SCR برای کاتالیست مورد مطالعه کمتر از zeolite و کاتالیست متداول $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ و بیشتر از کربن و کاتالیست‌های V_2O_5 بر پایه کربن می‌باشد. برای حذف NO از گازهای



Fixed-bed Reactor

Fluidized-bed Reactor

شکل ۳- تأثیر دمای خوراک بر میزان تبدیل NO

دودکش منابع مختلف نظیر واحدهای اسید نیتریک، ممکن است انتخابهای متعددی جهت قرار دادن راکتور SCR در مسیر عبور گاز دودکش وجود داشته باشد. در دماهای کمتر از 300°C ، فعالیت کاتالیست V_2O_5/SiO_2 قابل مقایسه با کاتالیست V_2O_5/TiO_2 می باشد و می توان از آن به جای کاتالیست متداول ولی گران قیمت V_2O_5/TiO_2 استفاده کرد.

جدول ۲- دمای متناظر با حداکثر میزان تبدیل برای کاتالیست مورد مطالعه و سایر کاتالیستهای متداول SCR

مرجع	دمای حداکثر میزان تبدیل ($^\circ\text{C}$)	کاتالیست
[۱۸]	۴۳۰	Zeolite ^۱
[۵]	۳۵۰	V_5O_5/TiO_2 (Commercial)
مطالعه حاضر	۲۸۸	7-10% V_5O_5/TiO_2
[۱۹]	۲۴۰	2% $V_5O_5/Activated Carbon$
[۳۰]	۱۳۰	Active Coke

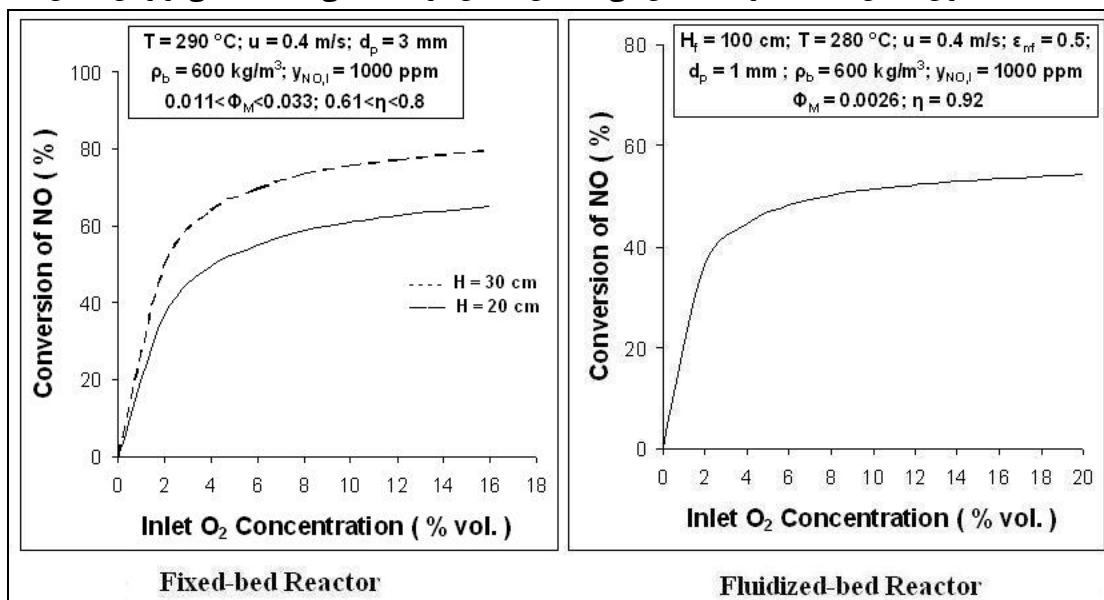
^۱ ترکیب: SiO_2 ۷۲-۸۰٪، Al_2O_3 ۱۷-۲۲٪، Fe_2O_3 ۱-۴٪ و کمتر از ۱٪ K_2O

۵-۳- اثر غلظت اکسیژن ورودی بر میزان تبدیل NO

اثر غلظت O_2 خوراک بر میزان تبدیل NO در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش غلظت O_2 از ۰ تا ۵٪ حجمی، میزان تبدیل به سرعت افزایش یافته اما فراتر از آن، سرعت افزایش میزان تبدیل کم شده به طوری که میزان تبدیل NO برای غلظت O_2 بیشتر از ۱۵٪ برای راکتور بستر ثابت و ۱۰٪ برای راکتور بستر سیالی تقریباً ثابت می شود. در حالت کلی وجود اکسیژن برای افزایش بازده فرایند SCR ضروری است.

۵-۴- اثر سرعت پر شدن (GHSV) بر میزان تبدیل NO

شکل ۵ اثر GHSV را بر میزان تبدیل NO در راکتور بستر ثابت نشان می دهد. با توجه به این شکل، با افزایش GHSV از ۰ تا 10000 h^{-1} STP، میزان تبدیل NO به سرعت کاهش می یابد. این کاهش در حالت کلی به علت ناشی از زمان تماس

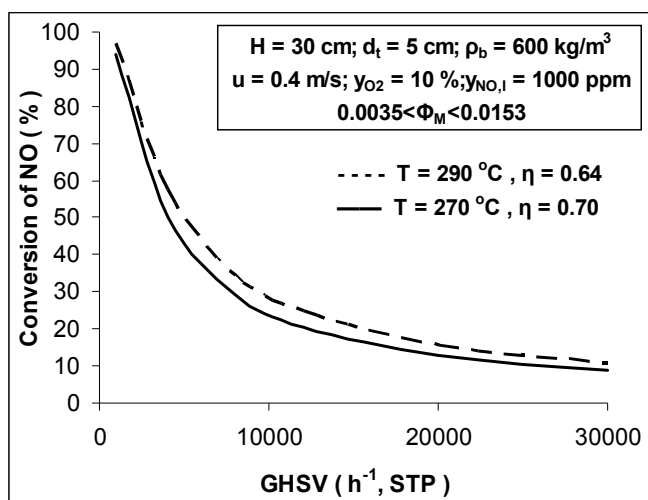


شکل ۴- تأثیر غلظت اکسیژن در خوراک بر میزان تبدیل NO

ناکافی بین واکنشگرها و سطح کاتالیست و مقدار ناکافی سایتهای فعال کاتالیت باعث شار زیاد واکنشگرها می باشد [۱۹]. در مورد کاتالیست مورد مطالعه برای اینکه میزان تبدیل NO در حدود ۹۰٪ باشد بایستی GHSV کمتر از 2000 h^{-1} STP باشد.

۶- نتیجه گیری

فرایند احیاء کاتالیستی انتخابی NO توسط NH_3 روی کاتالیست $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ در راکتورهای با بستر ثابت و سیالی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق، دو مدل ریاضی مختلف برای توصیف عملکرد راکتورهای بستر ثابت و سیالی را جهت فرایند SCR اکسید نیتریک با آمونیاک ارائه کرد. توافق خوبی بین نتایج مدل‌های پیشنهاد شده و داده های آزمایشگاهی بدست آمده مشاهده گردید. دمای بهینه برای احیاء کاتالیستی انتخابی NO توسط NH_3 روی کاتالیست مورد مطالعه در حدود 290°C بدست آمد که 60°C کمتر از کاتالیست متداول ولی گران قیمت $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ است. برای GHSV کمتر از 2000 h^{-1} STP،



شکل ۵- تأثیر GHSV بر میزان تبدیل NO

میزان تبدیل در حدود ۹۰٪ می باشد. وجود اکسیژن در گاز باعث افزایش میزان احیاء NO می شود. حداقل غلظت بهینه O_2 در خوراک برای عملیات بستر ثابت ۱۵٪ حجمی و برای عملیات بستر سیالی ۱۰٪ می باشد. این تحقیق به وضوح تانسیل بالای کاتالیست مورد مطالعه را برای کنترل انتشار آلاینده NO از منابع مختلف بویژه واحدهای تولید اسید نیتریک نشان می دهد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق توسط شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی مورد حمایت مالی قرار گرفته است که نویسندگان این مقاله از این حمایت کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- Forzatti, P. (2001) Present Status and Perspectives in De- NO_x SCR Catalysis, Applied Catalysis A: General, 222, 221-236
- Park, T.S., Jeong, S.K., Hong, S.H., and Hong, S.C. (2001). Selective Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides with NH_3 over Natural Manganese Ore at Low Temperature., Ind. Eng. Chem. Res., 40, 4491-4495
- Economidis, N., Coil, R.F., and Smirniotis, P.G. (1998). Catalytic Performance of $Al_2O_3/SiO_2/TiO_2$ Loaded with V_2O_5 for Selective Catalytic Reduction of NO_x with Ammonia. Catalysis Today, 40, 27-37
- Choi, H., Ham, S.W., Nam, I.N., and Kim, Y.G. (1996). Honeycomb Reactor Washcoated with Mordenite Type Zeolite Catalysts for the Reduction of NO_x by NH_3 . Ind. Eng. Chem. Res., 35, 106-112
- Lee, I.Y., Kim, D.W., Lee, J.B., and Yoo, K.O. (2002). A Practical Scale Evaluation of Sulfated V_2O_5/TiO_2 Catalyst from Metatitanic Acid for Selective Catalytic Reduction of NO by NH_3 . Chem. Eng. Jour., 90, 267-272
- Amiridis, M.D., and Solar, J.P. (1996). Selective Catalytic Reduction of Nitric Oxide by Ammonia over V_2O_5/TiO_2 , $V_2O_5/SiO_2/TiO_2$, and $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ Catalysts: Effect of Vanadia Content on the Activation Energy. Ind. Eng. Chem. Res., 35, 978-981
- Busca, G., Lietti, L., Ramis, G., and Berti, F. (1998). Chemical and Mechanistic Aspects of the Selective Catalytic Reduction of NO_x by Ammonia over Oxide Catalysts: A Review. Applied Catalysis, B: Environmental 18, 1-36
- Shikada, T., Fujimoto, K., Kunugi, T., and Tominaga, H. (1981). Reduction of Nitric Oxide with Ammonia on Vanadium Oxide Catalysts Supported on Homogeneously Precipitated Silica-Titania. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 20, 91-95
- Qajar, J. (2006). Theoretical and Experimental Investigation of NO_x Reduction in Fixed and Fluidized-bed Catalytic Reactors., MSc Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran

10. Koebel, M., and Elsener, M. (1998). Selective Catalytic Reduction of NO over Commercial DeNO_x-Catalysts: Experimental Determination of Kinetic and Thermodynamic Parameters. Chem. Eng. Sci., 53 (4), 657-669
11. Willi, R., Roduit, B., Koepfel, R.A., Wokaun, A., and Baiker, A. (1996). Selective Reduction of NO by NH₃ over Vanadia-based Commercial Catalyst: Parametric Sensitivity and Kinetic Modeling. Chem. Eng. Sci., 51 (11), 2897-2902
12. Fogler, H.S. (2006). Elements of Chemical Reaction Engineering. 4th ed., Pearson Education
13. Smith, J.M. (1981). Chemical Engineering Kinetics. 3rd ed., McGraw –Hill
14. Sirdeshpande, A.R., and Lighty, J.S. (2000). Kinetics of Selective Catalytic Reduction of NO with NH₃ over CuO/γ-Al₂O₃. Ind. Eng. Chem. Res. 39, 1781-1787
15. Mowla, D. and Qajar J. (2006). Experimental Kinetic Study of Selective Catalytic Reduction of NO over V₂O₅/SiO₂ Catalyst. In the Proceeding of the 11th Iranian Chemical Engineering Congress, Tarbiat Modarres University, Tehran, Nov. 28-30, page 138
16. Smith, J.M. and van Ness, H.C. (1975). Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. 3rd ed., McGraw – Hill
17. Kunni, D., and Levenspiel, O. (1991). Fluidization Engineering. 2nd ed., John-Wiley&Sons
18. Kiovsky, J.R., Koradia, P.B., and Lim, C.T. (1980). Evaluation of a New Zeolitic Catalyst for NO_x Reduction with NH₃. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 19, 218-225
19. Wang, Y., Liu, Z., Zhan, L., Huang, Z., Liu, Q., and Ma, J. (2004). Performance of an Activated Carbon Honeycomb Supported V₂O₅ Catalyst in Simultaneous SO₂ and NO Removal. Chem. Eng. Sci., 59, 5283-5290
20. Juntgen, H., Richter, E., Knoblauch, K. and Phu, T.H. (1988). Catalytic NO_x Reduction by Ammonia on Carbon Catalysts. Chem. Eng. Sci., 43 (3), 419- 428

Archive of SID

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی
تربیه آموزشی

مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها
دوره آموزشی

اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله
تربیه آموزشی

آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله