

بسم الله الرحمن الرحيم

درآمدی بر طراحی راکتورهای کاتالیستی

تالیف:

دکتر مرتضی سهرابی

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

زمستان ۱۳۸۹

سرفصلنامه : سهرابی، مرتضی، ۱۳۲۴ -
 عنوان و نام پدیدآور : درآمدی بر طراحی راکتورهای کاتالیستی / تالیف مرتضی سهرابی
 مشخصات نشر : تهران : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۹.
 مشخصات ظاهری : ش، ۲۶۹ ص.
 شابک : 978-964-463-412-3
 وضعیت فهرست نویسی : فبا.
 موضوع : راکتورهای شیمیایی -- طرح و ساختمان
 شناسه افزوده : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
 رده بندی کنگره : ۱۳۸۹ ۴۹۰ س / TP۱۵۷
 رده بندی دیویی : ۶۶۰/۲۸۳
 شماره کتابشناسی ملی : ۲۱۵۱۸۳۰



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 (پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب : درآمدی بر طراحی راکتورهای کاتالیستی
 تالیف : مرتضی سهرابی
 ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
 لیتوگرافی، چاپ و صحافی : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
 چاپ اول : زمستان ۱۳۸۹
 تیراژ : ۱۰۰۰ نسخه
 قیمت : ۶۹۰۰ تومان
 تلفن مرکز پخش: ۶۶۲۹۸۸۶۸
 شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۴۱۲-۳
 ISBN: 978-964-463-412-3

آدرس: خیابان ولی عصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار	ج
فهرست علائم	خ

بخش I درآمدی بر ویژگی‌های کاتالیست‌های جامد و واکنش‌های کاتالیستی

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- کاتالیست و تعریف	۱
۲-۱- فعالیت کاتالیست	۲
۳-۱- گزینش‌گری کاتالیست	۲
۴-۱- کاتالیست‌های منفی	۳
۵-۱- کاتالیست‌های ناهمگن	۳
۶-۱- ساخت کاتالیست	۴
۷-۱- مراحل واکنش‌های کاتالیستی	۵
۱-۷-۱- نفوذ واکنشگر از توده سیال به روی سطح کاتالیست	۵
۲-۷-۱- نفوذ به درون تخرخل قطعه کاتالیست	۶
۳-۷-۱- پدیده‌های سطحی	۱۰
۸-۱- اثر گرمایی در واکنش‌های کاتالیستی	۱۲
۹-۱- غیرفعال شدن (مسمومیت) کاتالیست	۱۵
مسمومیت ناهمگن	۱۸
مسائل	۲۰
منابع	۲۲

بخش II - رآکتورهای کاتالیستی

مقدمه	۲۷
منابع	۳۱

عنوان	صفحه
فصل دوم: رآکتورهای دوفازی بستر ثابت.....	۳۳
۱-۲- کلیات.....	۳۳
۲-۲- روش های عملیاتی.....	۳۶
۱-۲-۲- چگونگی جریان سیال.....	۳۶
۲-۲-۲- تنظیم گرمایش.....	۳۶
۳-۲- عوامل مهم در طراحی.....	۳۸
۱-۳-۲- ویژگی دانه و بستر کاتالیست.....	۳۸
۲-۳-۲- برهم کنش سیال- جامد، افت فشار.....	۳۹
۳-۳-۲- ملاحظات در مورد واکنش های برگشت پذیر.....	۴۰
۴-۲- دسته بندی مدل های رآکتور بستر ثابت.....	۴۳
۵-۲- معادلات پیوستگی و موازنه انرژی در یک رآکتور بستر ثابت.....	۴۵
۱-۵-۲- مدل شبه همگن دوبعدی و برقراری جریان پلاگ پراکنده.....	۴۵
(الف) معادله پیوستگی.....	۴۶
(ب) موازنه انرژی.....	۴۹
۶-۲- رآکتورهای بستر ثابت آدیاباتیک.....	۵۲
۱-۶-۲- مدل یک بعدی شبه همگن آدیاباتیک.....	۵۲
۲-۶-۲- مدل دوبعدی شبه همگن آدیاباتیک.....	۵۸
۷-۲- رآکتورهای بستر ثابت غیرهمدم و غیرآدیاباتیک.....	۵۸
۱-۷-۲- مدل یک بعدی.....	۵۹
۲-۷-۲- مدل دوبعدی.....	۶۱
۸-۲- عملیات بهینه در واحدهای منفرد.....	۶۵
۹-۲- سامانه چندواحدی آدیاباتیک با انتقال گرما در بین واحدها.....	۶۶
۱-۹-۲- عملیات چندواحدی با سرمایش به وسیله تزریق خوراک سرد.....	۶۹
۱۰-۲- مدل های ناهمگن بستر ثابت.....	۷۰
۱-۱۰-۲- مدل ناهمگن یک بعدی.....	۷۰
۲-۱۰-۲- مدل ناهمگن دوبعدی.....	۷۳
۳-۱۰-۲- ضرایب انتقال جرم و گرما و ضرایب پراکندگی سیال.....	۷۴

عنوان	صفحه
مسائل	۸۰
منابع	۸۵
فصل سوم: رآكتورهای بستر سیال	۸۷
۱-۳-۱- بستر سیال حبابی	۹۰
۱-۳-۱-۱- مدل‌های دوفازی	۹۱
۱-۳-۲- مدل‌های هیدرودینامیکی	۹۵
حداقل سرعت سیالیت	۹۷
۱-۳-۱-۲- مدل هیدرودینامیکی کانی - لونشپیل	۱۰۴
انتقال جرم در بسترهای سیال	۱۱۵
اجرای واکنش در بستر سیال	۱۱۹
۱-۳-۲-۲- مدل سه‌فازی حوزه‌ای حلواجی و رفاعی	۱۴۱
فرمول‌بندی مدل	۱۴۲
تعیین پارامترهای مدل	۱۴۶
۱-۳-۲-۳- بسترهای سیال چرخشی	۱۵۶
۱-۳-۲-۱- بستر سیال متلاطم	۱۵۹
مشاهدات تجربی در نظام بستر متلاطم	۱۶۰
۱-۳-۱-۲-۱- مدل چندناحیه‌ای ستوده- مستوفی	۱۶۲
۱-۳-۲-۲-۱- بستر سیال سریع	۱۶۷
۱-۳-۲-۲-۲- مدل هیدرودینامیکی بستر سیال سریع	۱۷۰
۱-۳-۲-۳-۱- بسترهای انتقالی	۱۷۷
۱-۳-۲-۳-۲- مدل بستر انتقالی براساس نگرش جریان‌های همگن یا پیوسته	۱۷۹
۱-۳-۳-۱- بسترهای فواره‌ای	۱۸۸
افت فشار در بستر	۱۹۰
حداقل سرعت فواره‌ای	۱۹۲
حداکثر عمق بستر فواره‌ای	۱۹۳
الگوی حرکت گاز در بستر	۱۹۳

عنوان	صفحه
الگوی حرکت قطعات جامد در بستر	۱۹۵
قطر فواره	۱۹۶
مسائل	۱۹۹
منابع	۲۰۱
فصل چهارم: رآكتورهای سه فازي.....	۲۰۵
۱-۴- رآكتورهای دوغابی	۲۰۶
۴-۱-۱- مدل دینامیکی رآكتور دوغابی بستر حبابی مداوم	۲۰۸
۴-۱-۲- مدل ساده شده رآكتورهای دوغابی	۲۲۶
۴-۱-۳- ویژگی ها و ضرایب انتقال در رآكتورهای دوغابی	۲۲۹
۴-۲- رآكتورهای بستر قطره‌ای	۲۳۹
۴-۲-۱- مدل دینامیکی رآكتور بستر قطره‌ای	۲۴۲
۴-۲-۲- مدل ساده شده رآكتورهای بستر قطره‌ای	۲۴۶
۴-۲-۳- ضرایب انتقال در رآكتورهای بستر قطره‌ای	۲۵۳
مسائل	۲۵۸
منابع	۲۶۲
نمایه.....	۲۶۵

پیشگفتار مؤلف

بسیاری از واکنش‌های صنعتی به کمک کاتالیست‌های مختلف انجام می‌گیرند. کاتالیست‌ها مواد متنوعی می‌باشند که از عناصر ساده تا ترکیبات بسیار پیچیده شیمیایی را شامل می‌شوند. در فصل نخست کتاب حاضر مروری کلی بر عملکرد و ویژگی‌های کاتالیست‌ها صورت گرفته است. برحسب نوع واکنش و مشخصات کاتالیست‌های مورد نیاز رآکتورهای گوناگونی طراحی شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. رآکتورهای کاتالیستی را اغلب به دو دسته دوفازی و سه‌فازی تقسیم می‌کنند. یکی از انواع مهم رآکتورهای دوفازی، رآکتورهای بستر ثابت است که در فصل دوم این کتاب به آن پرداخته شده و مدل‌های ریاضی مربوط به رفتار این گونه رآکتورها مورد بحث قرار گرفته است. رآکتورهای بستر سیال نوع دیگری از رآکتورهای کاتالیستی محسوب می‌شود که به صورت دوفازی و نیز سه‌فازی به کار برده می‌شوند. در کتاب حاضر رآکتورهای بستر سیال و رآکتورهای فواره‌ای در فصل سوم بررسی شده‌اند. در این فصل مدل‌های دوفازی و نیز هیدرودینامیکی بسترهای سیال حبابی همراه با ذکر مثال‌هایی ارائه شده است. علاوه بر این مطالعه جامعی در مورد نظام‌های دیگر بستر سیال شامل بستر متلاطم، بستر سریع و بستر انتقالی به عمل آمده است و مدل‌های CFD مربوط به دو نظام اخیر براساس هر دو الگوی متداول محیط‌های گسسته (لاگرانژی) و پیوسته (اولری) ذرات جامد مطالعه شده است. در همین فصل بحثی نیز در مورد بسترهای فواره‌ای که حدود ۵۵ سال از اختراع آن‌ها می‌گذرد به عمل آمده است. این رآکتورها دارای رفتار جالبی هستند که در سال‌های اخیر کوشش‌های قابل توجهی برای مدلسازی آن‌ها صورت گرفته است.

در فصل چهارم، رآکتورهای کاتالیستی سه‌فازی شامل بسترهای دوغابی و بسترهای قطره‌ای مطرح شده است. رآکتورهای سه‌فازی هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که امکان میعان واکنشگر گازی و نیز تبخیر واکنشگر مایع در شرایط عملیاتی میسر نباشد. البته در پاره‌ای موارد فاز مایع در این گونه رآکتورها نقش یک منبع حرارتی را به منظور حفظ همدمای سیستم برعهده دارد. واکنش‌های متعددی از جمله اکسایش، هیدروژندار کردن و گوگردزدایی مواد در این نوع رآکتورها انجام می‌شوند. در این فصل انواع مختلف رآکتورهای دوغابی از جمله ستون‌های حبابی مورد بحث واقع شده است. رآکتور بستر

قطره‌ای در حقیقت یک رآکتور بستر ثابت کاتالیستی محسوب می‌شود که دو فاز مایع و گاز معمولاً به صورت همسو و با شدت جریان کم از بالا و یا پایین بستر وارد رآکتور می‌شوند. اندک بودن شدت جریان فاز مایع در پاره‌ای موارد سبب ترشدن ناقص قطعات کاتالیست شده و کاهش بهره‌ عملکرد رآکتور را به دنبال دارد. بنابراین در مدلسازی رفتار رآکتور این مورد نیز باید در نظر گرفته شود.

در تألیف کتاب کوشش شده است که در هر بخش با ذکر مثال‌هایی مطالب مورد بحث به نحو مطلوب‌تری بیان شود. مراجع هر فصل در پایان همان فصل آورده شده تا اطلاع از منابع مورد استفاده به سادگی میسر شود. مطالب این کتاب جهت تدریس در دوره‌های تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی شیمی تدوین شده است. گرچه مسلم است که تألیف حاضر به هیچ عنوان نمی‌تواند خالی از نقص و اشتباه باشد. بنابراین مؤلف با پوزش از خوانندگان محترم تقاضا دارد بر وی منت گذارده و از هرگونه راهنمایی و تذکر اصلاحی و انتقادی دریغ نفرمایند تا در آینده نسبت به تصحیح و اعمال موارد لازم اقدام شود.

نویسنده خود را مدیون مسئولان و کارکنان محترم دانشگاه صنعتی امیرکبیر در همه رده‌ها می‌داند که همواره محبت کرده و تا حد مقدور امکانات لازم را بر این پژوهش و علم‌آموزی مؤلف فراهم کرده‌اند. به ویژه از مسئول و کارمندان محترم مرکز انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر که خود را در خدمت بستر علم و دانش قرار داده‌اند صمیمانه سپاسگزارم. همچنین تشکر ویژه از سرکار خانم مهندس آرزو نیکسیر دارم که با کمال دقت و صرف وقت و حوصله بسیار در تصحیح انتقادی متن همکاری بسیار ارزنده‌ای را با اینجانب داشته‌اند.

مرتضی سهرابی

فهرست علائم

a	فعالیت کاتالیست
a	ضریب معادله استوکیومتری
a_m	سطح انتقال به ازای واحد جرم، جرم/(طول)
a_s	شعاع فواره، (طول)
a_v	سطح انتقال جرم به ازای واحد حجم، حجم/(طول)
A	واکنشگر
A_c	سطح مقطع، 2 (طول)
Ar	عدد ارشمیدس، معادله (۳-۱۴۲)
b	ضریب معادله استوکیومتری
B	واکنشگر
C_b	غلظت در توده سیال، (حجم)/(مول)
C_d	غلظت در فاز چگال، (حجم)/(مول)
C_D	ضریب کشش
C_i	غلظت سازنده i ام، (حجم)/(مول)
C_{i0}	غلظت سازنده i ام در خوراک، (حجم)/(مول)
C_p	ظرفیت حرارتی در فشار ثابت، (دما)/(جرم)/(انرژی)
C_s	غلظت در سطح کاتالیست، (حجم)/(مول)
d_b	قطر حباب، (طول)
d_{cl}	قطر هیدرولیکی، (طول)
d_p	قطر دانه کاتالیست، (طول)
d_p^*	قطر بدون بعد ذره، معادله (۳-۱۴۲)
d_s	قطر فواره، معادله (۳-۲۱۹)، (طول)
D	قطر، (طول)
$\mathcal{D}$	ضریب نفوذ مولکولی، (زمان)/ 2 (طول)

D_e	ضریب پراکندگی، (زمان)/(طول) ^۲
D_{eff}	ضریب نفوذ موثر، (زمان)/(طول) ^۲
D_i	قطر مجرای گاز در بسترهای فواره‌ای، معادله (۳-۲۱۱)، (طول)
D_L	ضریب پراکندگی محوری، (زمان)/(طول) ^۲
D_t	قطر بستر یا ستون، (طول)
E	انرژی
E	انرژی فعالیت، (مول)/(انرژی)
f	ضریب اصطکاک
f_c	نسبت حجم ابر به حجم در بسترهای سیال
f_{cw}	نسبت حجم ابر - دنباله به حجم حباب در بسترهای سیال
f_d	جزء حجمی جامد در بستر
f_{di}	نیروی کشش وارد بر ذرات
f_w	نسبت حجم دنباله به حجم حباب در بسترهای سیال
F_i	شدت جریان مولی سازنده i ام، (زمان)/(مول)
Fr	عدد فرود (u^2/gD)
g	شتاب ثقل زمین، (زمان)/(طول) ^۲
G	سرعت جرمی، (زمان)(مساحت)/(جرم)
h	ضریب انتقال حرارت، (تفاضل دما)(مساحت)(زمان)/(انرژی)
H	آنتالپی، (انرژی)
H_i	ثابت قانون هنری برای سازنده i ام
ΔH_r	گرمای واکنش، (مول)/(انرژی)
j	عامل j (معادله ۱-۲)
k	ثابت سرعت واکنش
k	ثابت بولتزمن، (دما)/(انرژی)

ثابت سرعت سمومیت کاتالیست	k_d
ضریب هدایت حرارتی، (دما)/(طول)/(زمان)/(انرژی)	k_e
ضریب انتقال حرارت، (دما)/(طول)/(زمان)/(انرژی)	k_f
ضریب انتقال جرم لایه گاز، (زمان) ² /(طول)/(حجم)	k_g
ضریب انتقال جرم لایه مایع، (زمان) ² /(طول)/(حجم)	k_l
ضریب انتقال جرم بین توده گاز و کاتالیست، (زمان)/(طول)	k_m
ضریب پیش جمله نمایی در معادله آرنیوس	k_o
ضریب کلی انتقال جرم، (زمان)/(طول)	K
ثابت تعادل	K
ضریب تبادل گاز بین حباب و ابر در بستر سیال، $^{-1}$ (زمان)	K_{bc}
ضریب تبادل گاز بین ابر و امولسیون در بستر سیال، $^{-1}$ (زمان)	K_{ce}
طول بستر	L
طول مشخصه کاتالیست	L
عدد لونشپیل (uL/D_e)	Le
حداکثر ارتفاع بستر فواره‌ای، (طول)	L_{sm}
جرم	m
جریان جرمی، (زمان)/(جرم)	$\dot{m}$
درجه واکنش	n
تعداد منافذ پخش‌کننده گاز	n_d
تعداد حوضه‌ها در بستر سیال	N
عدد توان، معادله (۴-۵۴)	N_p
عدد ناسلت، (hd/k)	Nu
فشار جزئی سازنده i ام	p_i
فشار کل	P
توان، (زمان)/(انرژی)	P
محصول واکنش	P

Pr	عدد پرنتل $(\frac{C_p \mu}{k_f})$
q	حجم گاز تبادل شده بین فازها به ازای واحد حجم حباب (حجم حباب) / (زمان)
Q	شدت انتقال حرارت، (زمان)/(انرژی)
r	فاصله شعاعی، (طول)
r_a	مقاومت در برابر جذب گاز در رآکتور دوغابی
r_c	مقاومت در برابر نفوذ خارجی در رآکتور دوغابی
$-r_i$	معادله سرعت تجزیه سازنده i ام، (زمان)/(جرم کاتالیست)/(مول) یا (زمان) (حجم) / (مول)
r_p	شعاع قطعه کاتالیست، (طول)
r_r	مقاومت واکنش شیمیایی در رآکتور دوغابی
R	سرعت کلی واکنش در رآکتور دوغابی، (معادله ۴-۳۰)
R	محصول واکنش
Re	عدد رینولدز $(\frac{\rho u d_p}{\mu})$
S	محصول واکنش
S	سطح قطعه کاتالیست، $(\text{طول})^2$
S	نیروی کشش وارد بر فاز جامد
Sc	عدد اشمیت، $(\frac{\mu}{\rho D})$
Sh	عدد شروود، (kd_p / D)
S_{ij}	تانسور پیچش
St	عدد استنتون، $(h / \rho C_p v)$
T	دما
T_r	دمای سیال مبرد، (معادله ۴-۱۱)
u	سرعت، (زمان)/(طول)
u_b	سرعت صعود یک دسته حباب، (زمان)/(طول)

u_b	سرعت صعود یک حباب منفرد، (زمان)/(طول)
u_d	سرعت حرکت فاز چگال، (زمان)/(طول)
u_e	سرعت حرکت فاز امولسیون، (زمان)/(طول)
u_{mf}	حداقل سرعت سیالیت، (زمان)/(طول)
u_t	سرعت حد ذرات جامد، (زمان)/(طول)
u_o	سرعت گاز ورودی، (زمان)/(طول)
u^*	سرعت بدون بعد، (معادله ۳-۱۴۴)
U	ضریب کلی انتقال حرارت، (تفاضل دما)/(سطح)(زمان)/(انرژی)
U_b	سرعت ظاهری فاز حباب، (زمان)/(طول)
v	شدت جریان حجمی، (زمان)/(حجم)
v_{ij}	سرعت نسبی بین قطعات جامد، (زمان)/(طول)
V	حجم
W	وزن کاتالیست، (جرم)
We	عدد وبر ($Lu^2\rho/\sigma$)
X_i	میزان تبدیل واکنشگر i ام
z	فاصله محوری، (طول)
z'	فاصله محوری بدون بعد

حروف یونانی

α	حجم دنباله به حجم حباب در بسترهای سیال
α_{ij}	ضریب استوکیومتری سازنده i ام در واکنش j
β	ضریب بدون بعد، (معادله ۱-۱۹)
γ_b	حجم کاتالیست در حباب به حجم حباب
γ_e	حجم کاتالیست در امولسیون به حجم حباب
Γ_w	ضریب ترشوندگی در راکتور بستر قطره‌ای
δ	جزء حجمی فاز حباب در بستر سیال

ε	فضای تهی
ε_p	غلظت محلی ذرات جامد
ζ	اندازه گردانه‌ها، (معادله ۴-۵۹) (طول)
η	ضریب تاثیر کاتالیست
θ	زاویه مخروط بستر فواره‌ای، (معادله ۳-۲۱۶)
θ	مکان فعال در کاتالیست
θ_i	دمای ذره‌ای
μ	ویسکوزیته، (زمان)/(طول)/(جرم)
ν	ویسکوزیته سینماتیک، (زمان) ^۲ /(طول)
ρ	جرم ویژه، (حجم)/(جرم)
ρ_B	جرم ویژه کاتالیست در بستر (توده‌ای)، (حجم)/(جرم)
σ	کشش سطحی
σ	ضریب انسداد در کاتالیست
$\bar{\tau}$	ضریب خمیدگی در کاتالیست
τ_i	تنش برشی، (معادله ۳-۱۹۰)
ϕ	ضریب تیل در کاتالیست
ϕ	ضریب تصحیح، (معادله ۴-۵۳)
ϕ_s	ضریب کرویت
ψ	سرعت تبادل دمای ذره‌ای، (معادله ۳-۱۹۷)
Ω	سرعت پخش دمای ذره‌ای ناشی از اصطکاک، (معادله ۳-۱۹۷)

زیرنویس

b	حباب
B	توده
cat	کاتالیست
d	چگال یا جامد
den	فاز چگال
dil	فاز رقیق
e	موثر
e	امولسیون

سیال مبرد	f
گاز	g
سازنده i ام	i
سازنده j ام	j
مایع	l
محوری	L
در شرایط حداقل سیالیت	mf
قطعه یا دانه	p
شعاعی	r
سطح	s
جامد	s
خوشه‌ای	sus
بستر یا ستون	t
کل	t
دنباله	w
محوری	z

بالانویس

برخورد	$coll$
سطح خارجی کاتالیست	s
ورودی یا اولیه	o
بدون بعد	$*$

I بخش

درآمدی بر ویژگی‌های کاتالیست‌های جامد
و واکنش‌های کاتالیستی

کلیات

۱-۱- کاتالیست و تعریف آن

کاتالیست عبارت از ماده‌ای است که با مقداری اندک سبب ایجاد تغییرات عمده می‌شود. تعاریف دقیق‌تر در کاتالیست به تدریج و در ضمن درک ویژگی‌ها و پدیده‌های مختلف کاتالیستی ارائه شده است. البته در حال حاضر توافق کلی و یکسانی بر تعریف واحدی از کاتالیست حاصل نشده و دیدگاه‌های گوناگونی بین پژوهشگران در زمینه کاتالیست‌های ناهمگن و همگن و نیز آنزیم‌ها وجود دارد. با توجه به مراتب بالا شاید جامع‌ترین تعریف برای کاتالیست به صورت زیر باشد:

کاتالیست عبارت از ماده‌ای است که سرعت واکنش‌ها را به سوی تعادل تسریع می‌کند، بدون آن‌که به میزان قابل توجهی به مصرف برسد.

براساس آنچه که از مطالعه شیمی کاتالیست حاصل شده است، یک واکنش کاتالیستی مرکب از یک چرخه فرض می‌شود که در طی آن ابتدا مکان‌های فعال واقع بر سطح خارجی کاتالیست با ترکیب‌شونده‌ها کمپلکس‌هایی تشکیل می‌دهد و در مرحله بعد محصولات واکنش از سطح کاتالیست جدا شده و مکان‌های فعال، آزاد می‌شوند و این تحول ادامه می‌یابد.