

مبانی و اصول دوازده گانه شیمی سبز

حسین فرهنگیان^{۱*}

^۱ پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

Email: Farhangian@ccerci.ac.ir

چکیده

شیمی سبز برای بهبود اقتصاد، تولید مواد شیمیایی و افزایش حفاظت از محیط زیست مورد نیاز است. مفهوم شیمی سبز یک تکنولوژی جذاب برای شیمی دان ها، محققان و صنعتگران، برای تحقیق بر روی کاربردهای نوآورانه شیمی است. شیمی سبز به عنوان کاهش آسیب محیطی همراه با تولید مواد و به حداقل رساندن و دفع صحیح پسماندهای تولید شده در طول فرآیندهای شیمیایی مختلف مشخص می شود.

شیمی سبز عموماً براساس دوازده اصل بیان می شود. این اصول شامل دستورالعمل هایی برای تولید محصولات شیمیایی جدید، ترکیب جدید و فرایندهای جدید است که در این مقاله به شرح مختصر آنها پرداخته خواهد شد.

واژگان کلیدی: شیمی سبز، پسماند، شیمی بی خطر، محیط زیست، اقتصاد اتم

مقدمه

شیمی سبز برای بهبود اقتصاد، تولید مواد شیمیایی و افزایش حفاظت از محیط‌زیست مورد نیاز است. مفهوم شیمی سبز یک تکنولوژی جذاب برای شیمیدان‌ها، محققان و صنعتگران برای تحقیق بر روی کاربردهای نوآورانه شیمی است.

در ابتدا، شیمی سبز به عنوان کاهش آسیب محیطی همراه با تولید مواد و به حداقل رساندن و دفع صحیح پسماندهای تولید شده در طول فرآیندهای شیمیایی مختلف مشخص می‌شود.

طبق تعریف دیگری، شیمی سبز یک تکنیک جدید است که به سنتز، پردازش و کاربرد مواد شیمیایی به گونه‌ای اختصاص دارد که خطرات را برای انسان‌ها و محیط‌زیست به حداقل می‌رساند.

بنابراین، نیاز اساسی به بهبود شیمی سنتزی و مهندسی ترکیبی از مواد اولیه سازگار با محیط‌زیست یا طراحی مناسب مسیره‌های تولید جدید که مصرف و تولید مواد سمی را با استفاده از منابع انرژی مدرن کاهش می‌دهد، وجود دارد.

اصول اساسی شیمی سبز

شیمی سبز عموماً براساس ۱۲ اصل ارایه شده توسط آناستاز و وارنر ارایه می‌شود [۱]. این اصول شامل دستورالعمل‌هایی برای اجرای محصولات شیمیایی جدید، ترکیب جدید و فرایندهای جدید است که در این مقاله به شرح مختصر آنها پرداخته خواهد شد.

جلوگیری از تولید پسماند بهتر از تصفیه یا پاکسازی

پسماند پس از تشکیل آن است

این بیانیه یکی از رایج‌ترین دستورالعمل‌ها در بهینه‌سازی فرآیند است که توانایی شیمیدان‌ها را برای طراحی مجدد واکنش‌های شیمیایی به منظور به حداقل رساندن تولید پسماند خطرناک به عنوان یک گام مهم در جهت جلوگیری از آلودگی توصیف می‌کند. با جلوگیری از تولید پسماند، خطرات مرتبط با انبار کردن پسماند، حمل و نقل و درمان را می‌توان به حداقل رساند.

درک و پذیرش این اصل برای صنعت و دانشگاه آسان است و اهمیت و امکان پذیر بودن آن را ثابت کرده‌اند. با این حال، ما باید آن را در یک بافت وسیع‌تر تصور کنیم، تغییر از تفسیر محدود پسماند براساس کمیت آن به یک روش جهانی برای مقابله با موضوع "پسماند" که برای آن باید موارد زیر را در نظر بگیریم:

- ✓ باید ماهیت چند بعدی پسماند را در نظر بگیریم.
- ✓ ما باید از اصل "مقدار پسماند در هر مقدار محصول" به سمت یک اصل که "مقدار پسماند تولید شده در ازای هر عملکرد ارایه‌شده توسط محصول" را نشان می‌دهد، حرکت کنیم " در این زمینه، ما باید هم کیفیت و هم قابلیت تولید محصولات را بهتر کنیم.
- ✓ با در نظر گرفتن کل چرخه عمر یک محصول، ما باید به این حقیقت بپردازیم که نه تنها خود فرآیند تولید پسماند تولید می‌کند بلکه "هدر دادن پسماند" پس از دوره عمر محصول یا مصرف نیز آن را تولید می‌کند. این امر شامل تبدیل این مواد به محصولات با ارزش و سپس قابلیت بازیافت آن‌ها می‌باشد.

به طور کلی، حرکت به سوی "توقف تولید پسماند" و "جلوگیری از پسماند" شامل مدرن‌سازی فرایندهای صنعتی از طریق تکنیک‌های سبز است. هدف از این تکنیک‌ها کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید فاضلاب، پسماندهای جامد و تولید نویز است. به طور کلی، آن‌ها برای کمک به حفاظت از آب و هوا و محیط‌زیست توسعه یافته اند [۲].

با این حال، مناسب‌ترین استراتژی برای جلوگیری از تولید پسماند به سادگی تولید محصول مورد نظر نخواهد بود. در اغلب موارد، این کار عملی نخواهد بود با این حال، تولید محصولات کاملاً جدید با کیفیت بالاتر و دوام بیشتر، منطقی به نظر می‌رسد. مقادیر پایین‌تر چنین محصولاتی، برای انجام یک وظیفه مطلوب کافی هستند.

یک روش جایگزین اجتناب از تبدیل محصول به پسماندهای نامطمئن است به عنوان مثال تولید پلاستیک زیست تخریب پذیر به جای پلاستیک‌های بسیار مقاوم.

مولکول‌های مختلف سنتز شده برای کاربردهای دارویی یا کشاورزی یافت می‌شود؛ این ترکیبات یا دارای سمیت بوده و یا موجودات زنده را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند.

انتخاب ترکیبات و موادی که برای افزایش کارایی واکنش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نقطه عطفی در توسعه فرآیند است؛ شیمیدان‌ها باید توجه بیشتری به تصمیم‌گیری در مورد این که چه موادی در مخازن واکنش قرار گیرند، داشته باشند. ساده است که همه پسماندها را نادیده بگیریم و همه تلاش‌ها را منحصر به مسیر شیمیایی که محصول مورد نظر را برای ما فراهم می‌کند، اختصاص دهیم. با این حال، جدی نگرفتن تمام مواد دیگر موجود در فرآیند تولید در نهایت منجر به قیمت بالا برای محصول می‌شود، و ما در نهایت باید از شر این سناریو خلاص شویم.

گاهی اوقات، شیمیدان‌ها در واقع مولکول‌های خطرناکی تولید می‌کنند، و در نتیجه، اصل بعدی به طراحی مولکول‌هایی اختصاص دارد که ذاتاً در طبیعت خود امن‌تر هستند [۸].

طراحی شیمیایی و محصولات امن‌تر

محصولات شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که به عملکرد مورد نظر خود برسند و همزمان سمیت خود را به حداقل برسانند. محصولات جدید را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که ذاتاً امن‌تر باشند، در حالی که برای کاربرد هدف بسیار موثر هستند. به عنوان مثال، ترکیب مستقیم پسماند مایعات رادیواکتیو با سیمان همراه با خاک رس، یک روش موثر در تثبیت ضایعات آلی خطرناک با مواد بسیار ارزان و خاک رس طبیعی برای تولید یک محصول پایدار و ایمن برای حمل و نقل، تبدیل و دفع در نظر گرفته می‌شود [۹].

حلال‌های امن و مواد کمکی

این اصل استفاده از حلال‌های ایمن‌تر و مواد کمکی را ترویج می‌کند. حلال یعنی هر ماده‌ای است که به طور مستقیم در ساختار محصول واکنش نقش ندارد اما هنوز برای آنکه واکنش شیمیایی رخ دهد لازم و ضروری است. علاوه بر این، حلال به

با توجه به این ایده‌ها، ما باید اساساً درک خود را از پسماند به عنوان یک ماده خطرناک تغییر دهیم و به پسماند به یک منبع که می‌تواند به عنوان مواد اولیه برای تولید محصولات جدید عمل کند، نگاه کنیم [۳].

حداکثر کردن اقتصاد اتم

اقتصاد اتم مفهومی است که در اوایل دهه نود برای ارزیابی کارایی تبدیل‌های شیمیایی بر پایه عنصر به عنصر توسعه یافته است [۴]. مفهوم "اقتصاد اتم" براساس نسبت کل جرم اتم‌ها در محصول هدف به کل جرم اتم‌ها در مواد اولیه است. یک گزینه برای کاهش تولید پسماند طراحی واکنش‌های شیمیایی است که ادغام تمام مواد به کار رفته در فرآیند را در محصول نهایی به حداکثر می‌رساند و منجر به تعداد اتم‌های هدر رفته کمتری می‌شود. از این رو، انتخاب چنین مسیرهایی که سهم عمده مواد اولیه را در محصولات مورد نظر قرار می‌دهد، بازده بالاتری را نشان می‌دهد و به کاهش پسماند کمک می‌کند. این مفهوم امروزه به طور گسترده‌ای در مسیره‌های جدید برای تولید ترکیبات آلی مختلف به کار می‌رود، به عنوان مثال، موادی که در زمینه پزشکی و داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵ - ۷].

طراحی شیمیایی کم‌تر خطرناک

در شیمی آلی، تاثیر گذار کردن یک تبدیل شیمیایی موفق به روشی جدید یا با یک مولکول جدید یا با یک ترتیب جدید چیزی است که با توجه به اصول شیمی سبز اهمیت دارد. محققان مختلف به وضوح رابطه مستقیم سمیت و خطرات همراه با واکنش‌های شیمیایی به مواد موجود در ظرف واکنش را نشان داده‌اند. به طور کلی، طیف سمیت کلی محصولات یا فرآیندها، همراه با دیگر معیارهای پایداری و شیمی سبز، به شدت تحت‌تاثیر شیمی پشت یک فرآیند و تغییر و تحولی است که در یک زنجیره سنتز شیمیایی نقش دارد. در چنین مواردی یک استثنا وجود دارد که در آن یک مولکول با هدفی تولید می‌شود که برای نمایش سمیت و یا فعالیت بیولوژیکی ویژه‌ای طراحی شده‌است. برای مثال، این سناریو در مورد

جای استفاده از سوخت‌های فسیلی در شرایط اکولوژیکی موثرتر است. چگونه انرژی به اشکال مفید تبدیل می‌شود و جایی که انرژی از دست می‌رود مهم‌ترین سوالات مهندسان و طراحان برای کمک به جامعه برای استفاده موثرتر از انرژی است.

در نتیجه شیمی سبز شامل به حداقل رساندن اتلاف انرژی مانند اصطحاک مکانیکی، انتقال حرارت ناخواسته از طریق بهبود چیدمان و عایق یخچال یا طراحی وسایل نقلیه سبک‌تر با ویژگی‌های آیرودینامیکی بهتر و مقاومت کم‌تر است.

علاوه بر این، هنگام توسعه یک فرآیند جدید، تاثیر موقعیت جغرافیایی کارخانه‌های تولید باید در نظر گرفته شود: مقایسه اکولوژیکی سناریوهای مختلف تولید برای یک محصول مشابه، در این مورد پلاستیک‌های زیستی، به وضوح نشان می‌دهد که فن‌آوری‌های مختلف تولید انرژی، منابع تولید انرژی، و اثر ترکیب‌های انرژی موجود در کشورهای مختلف برای اثرات اکولوژیکی یک فرآیند جدید قابل توجه می‌شود [۱۴].

استفاده از مواد خام تجدید پذیر

با توجه به اصول شیمی سبز، مواد خام باید تجدید پذیر باشند تا از نظر فنی و اقتصادی عملی باشند. استفاده از منابع تجدید پذیر مانند زیست توده میکروبی یا گیاهی، که در چرخه کربن بسته طبیعت جای گرفته‌اند، یک گزینه واقعی برای آماده‌سازی محصولات زیستی کاربردی به روشی پایدار و کمک به انتقال انرژی است.

در زمینه اصل ۷ شیمی سبز که موضوع مواد خام تجدید پذیر را مورد توجه قرار می‌دهد، امروزه شاهد تعداد زیادی از هم‌کاری‌های چند رشته‌ای فعلی هستیم که شامل زمینه‌های کشاورزی، بیوشیمی، بیوتکنولوژی، شیمی، میکروبیولوژی، فیزیک، سم‌شناسی یا گرایش‌های مهندسی است. این هم‌کاری منجر به توسعه سوخت‌های نسل آینده، پلیمرها، و دیگر مواد محوری برای جامعه امروز ما براساس منابع تجدید پذیر می‌شود و با تاثیر کم بر سلامت و محیط‌زیست مشخص می‌شود. پویایی جهانی فعلی این تحولات در واقع دلیلی برای خوش بینی نسبت به آینده است [۸]. یافتن روشی برای

بر انتخاب فرآیندهای مناسب پایین‌دست و بازسازی و تکنیک‌های بازیافت یا دفع نظارت دارد.

عمدتاً، واکنش‌های ترکیبات آلی در محیط‌های مایع رخ می‌دهد، که در آن حلال به روش‌های مختلف عمل می‌کند:

✓ می‌تواند تماس افزایش یافته بین واکنش دهنده‌ها را ممکن سازد

✓ می‌تواند واسط‌های تولید شده را پایدار یا ناپایدار کند

✓ می‌تواند بر حالت‌های انتقال تاثیر بگذارد.

با در نظر گرفتن تاثیر اکولوژیکی فرآیندهای شیمیایی، مفاهیم جدیدی برای جایگزینی حلال‌های آلی فرار به یک چالش بزرگ در شیمی سبز تبدیل شده‌اند. یک حلال سبز باید دارای معیارهای متعددی از جمله سمیت کم، عدم اشتعال پذیری، غیر جهش‌زایی، ناپایداری و در دسترس بودن باشد. علاوه بر این، این حلال‌های سبز باید ارزان بوده و به آسانی قابل بازیافت باشند [۱۰، ۱۱].

نمونه‌های اولیه در زمینه استخراج بیوپلیمرهای پلی هیدروکسی آلکانوات میکروبی که نوعی مواد ذخیره‌سازی درون سلولی هستند، از زیست توده ارایه شده‌اند [۱۲]. برای این فرآیند استخراج، که به طور معمول با استفاده از حلال‌های هالوژنه ناپایدار انجام می‌شود، استفاده از حلال‌های سبز و روش‌های بدون حلال بیشتر نمود می‌کند [۱۳].

طراحی برای بهره‌وری انرژی

معمولاً انرژی برای افزایش سطح رفاهی زندگی انسان به روش‌های مهم استفاده می‌شود. منابع انرژی که به طور سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند زغال‌سنگ، نفت و گاز از نظر تامین انرژی محدود هستند و احتراق آن‌ها گازهای گلخانه‌ای را آزاد می‌کند. برای بهبود مستمر کیفیت زندگی، هر دو حرکت به سمت انرژی‌های تجدید پذیر و طراحی برای بهره‌وری انرژی مورد نیاز است. طراحی فرایندهای کارآمدتر با انتخاب مناسب‌ترین فن‌آوری‌ها و عملیات‌های واحد باید به موازات انتخاب منابع انرژی مناسب انجام شود. استفاده از یک موتور الکتریکی با منابع انرژی تولید شده از خورشید و باد به

مورفولوژی نانوساختارها برای تطبیق خواص فیزیکی و شیمیایی آنها، توسعه یافته است. سیستم‌های نانوکاتالیست که هسته پارامغناطیس را در بر می‌گیرند، امکان تبدیل سریع و انتخابی شیمیایی با بازده محصول عالی را فراهم می‌کنند که با جداسازی و بازیابی کاتالیست همراه است [۱۸] .

طراحی برای تخریب

یکی از مهم‌ترین اهداف شیمی سبز به حداکثر رساندن تولید با به حداقل رساندن محصولات جانبی ناخواسته است. طراحی محصولات و فرایندهایی که تاثیر کمتری بر انسان‌ها و محیط‌زیست دارند، مانند ایجاد و استفاده از کامپوزیت پایدار به عنوان یک محصول برای کاربردهای مختلف به عنوان یک ماده بی‌اثر برای تثبیت سطوح کم و متوسط از پسماندهای رادیواکتیو، کاشی‌های تزئینی، آجرهای ساختمانی و بتن سبک [۸] .

تحلیل زمان واقعی برای پیش‌گیری از آلودگی

با پیشرفت در شیمی، تولید مواد شیمیایی سمی متعدد یک مشکل جدی برای محیط‌زیست است. یکی از مفاهیم اصلی شیمی سبز برای متخصصان پیش‌گیری از آلودگی است. استفاده از مواد کمتر خطرناک در فرمولاسیون شیمیایی و کاهش تولید پسماند برای سال‌های زیادی ضروری به نظر می‌رسد. در نتیجه هدف شیمی سبز از بین بردن مصرف و تولید مواد خطرناک از طریق طراحی فرایندهای تولیدی بهتر برای مواد شیمیایی با حداقل تولید پسماند با نظارت مجدد بر فرایندهای در حال اجرا است [۱۹] .

استفاده از شیمی برای پیش‌گیری از حادثه

اجتناب از مواد شیمیایی بسیار واکنش پذیر که می‌توانند به طور بالقوه باعث بروز حادثه در طول واکنش شوند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مواد شیمیایی و شکل ماده‌ای که در فرآیند شیمیایی به کار می‌رود باید به گونه‌ای انتخاب شود که پتانسیل حوادث شیمیایی از جمله آزاد شدن سم، انفجار و تشکیل آتش را به حداقل برساند. به عنوان مثال، فراوان‌ترین محیط محلول، آب، می‌تواند به طور تصادفی با جریان یافتن

تبدیل ضایعات خام مانند الیاف زائد اسپینی به مواد پایدار شده کامپوزیت می‌تواند کاربرد بسیار خوبی از این اصل شیمی سبز باشد. باید توجه داشت که استفاده از منابع تجدید پذیر مفهوم فرآیند را با گنجاندن تامین منابع، حمل و نقل، ذخیره‌سازی، و دیگر جنبه‌های لجستیک در طراحی فرآیند گسترش می‌دهد. با این حال، چنین تغییری در مواد خام، منجر به تغییر اساسی در ساختار فرایندها، فن‌آوری‌های مورد استفاده و مفاهیم اقتصادی صنعت و جامعه می‌شود [۱۵] .

کاهش مشتقات

بسیاری از فرایندها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که استفاده از معرف‌های اضافی و پسماندهای حاصل را کاهش دهند. معمولا لازم است که مشتقی از یک ترکیب حاوی گروه‌هایی که در محصول نهایی مورد نیاز نیستند، سنتز شود، اما به مراحل سنتز یا خالص‌سازی اجازه می‌دهد تا راحت‌تر پیش بروند. با این حال، این مشتقات منجر به کاهش اقتصاد اتم می‌شوند، زیرا اتم‌هایی را معرفی می‌کنند که در محصول نهایی یافت نمی‌شوند، اما در نهایت به عنوان ضایعات به کار می‌روند. این در تضاد با اصل بهره‌وری اتم است. در حال حاضر تلاش‌های تحقیقاتی برای یافتن جایگزینی برای آنها انجام می‌شود [۱۶] .

کاتالیز

بسیاری از فرایندها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که استفاده از معرف‌های اضافی و پسماندهای حاصل را کاهش دهند. کاتالیز، واکنش شیمیایی فعال شده یا تسریع شده توسط کاتالیزور است. طبق گفته اوستوالد، کاتالیزورها موادی هستند که با فعال کردن یک حالت گذار با انرژی مطلوب بین واکنش دهنده‌ها، واکنش را سرعت می‌بخشند، اما توسط آن مصرف نمی‌شوند و در معادله واکنش خالص ظاهر نمی‌شوند [۱۷] . کاتالیست‌ها نقش اساسی در اقتصاد صنعتی مدرن، در نظارت بر محیط‌زیست و در تمام فرایندهای زیستی ایفا می‌کنند. اخیرا، سنتز نانوکاتالیست‌ها با اندازه و شکل خاص به منظور امکان حرکت آسان مواد در فاز واکنش و کنترل

- Diazo ketones by 1, 3-dipolar Cycloaddition of nitrous oxide at cyclic alkynes under mild conditions. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011;**50**(27):6171-6174
7. Baghbanzadeh M, Pilger C, Kappe CO. Rapid nickel-catalyzed Suzuki- Miyaura crosscouplings of aryl Carbamates and Sulfamates utilizing microwave heating. *The Journal of Organic Chemistry*. 2011;**76**(5):1507-1510
 8. <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>
 9. Eskander SB, Bayoumi TA, Saleh HM. Leaching behavior of cement-natural clay composite incorporating real spent radioactive liquid scintillator. *Progress in Nuclear Energy*. 2013;**67**:1-6
 10. Kerton FM. *Alternative Solvents for Green Chemistry*. Clark J: RSC Green Chemistry Series, Series Editors; 2009
 11. Yanlong G, Jérôme F. Glycerol as a sustainable solvent for green chemistry. *Green Chemistry*. 2010;**12**:1127-1138
 12. Koller M, Niebelschütz H, Braunegg G. Strategies for recovery and purification of poly [(R)-3-hydroxyalkanoates] (PHA) biopolyesters from surrounding biomass. *Engineering in Life Sciences*. 2013;**13**(6):549-562
 13. Murugan P, Han L, Gan CY, Maurer FH, Sudesh K. A new biological recovery approach for PHA using mealworm, *Tenebrio Molitor*. *Journal of Biotechnology*. 2016;**239**:98-105
 14. Shahzad K, Kettl KH, Titz M, Koller M, Schnitzer H, Narodslawsky M. Comparison of ecological footprint for biobased PHA production from animal residues utilizing different energy resources. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2013;**15**(3):525-536
 15. Narodslawsky M. Structural prospects and challenges for bio commodity processes. *Food Technology and Biotechnology*. 2010;**48**(3):270-275

درون یک مخزن حاوی گاز متیل ایزوسیانات، مقدار زیادی از متیل ایزوسیانات را به محیط اطراف آزاد کند. سایر مواد مشهور که تحت واکنش‌های حاصل از آب قرار می‌گیرند، در میان فلزات قلیایی یافت می‌شوند. اگر واکنش دیگری توسعه می‌یافت که از این معرف استفاده نمی‌کرد، خطر انفجار منجر به مرگ به حداقل می‌رسید.

به طور ذاتی، شیمی ایمن نیز می‌تواند در حالت جریان با استفاده از ریزراکتورهای لوله‌ای با کانال‌های واکنشی با قطر کوچک انجام شود. چنین رویکردهایی، حجم واکنش، زمان واکنش و نیاز کاتالیست را به شدت کاهش می‌دهند، با افزایش بازده فضا و زمان فرآیندها را تشدید می‌کنند و حتی امکان انجام واکنش‌های بسیار خطرناک به روشی ایمن را فراهم می‌سازند [۸]. علاوه بر این، کاربرد شیمی جریان در ریزراکتورها نیز یک استراتژی برای غلبه بر اشکالات کلاسیک فرآیندهای ناشی از مایکروویو، مانند عمق نفوذ محدود مایکروویو به داخل محیط جذب، نشان می‌دهد [۸].

منابع

1. Anastas PT, Warner JC. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York: Oxford University Press; 1998
2. Schnitzer H, Ulgiati S. Less bad is not good enough: Approaching zero emissions techniques and systems. *Journal of Cleaner Production*. 2007;**15**(13-14):1185-1189
3. Peters M., von der Assen N. It is better to prevent waste than to treat or clean up waste after it is formed – Or: What Benjamin Franklin has to do with “Green Chemistry” *Green Chemistry*, **18**(5):1172-1174
4. Trost BM. The atom economy-a search for synthetic efficiency. *Science*. 1991;**254**(5037): 1471-1477
5. Kondo T. On inventing catalytic reactions via ruthena- or rhodacyclic intermediates for atom economy. *Synlett*. 2008;**2008**(5):629-644
6. Banert K, Plefka O. Synthesis with perfect atom economy: Generation of

16. <http://www.orgchemboulder.com/Labs/Handbook/GreenChemistry.pdf>
17. Weitkamp J. Katalyse. Chemie Ingenieur Technik. 2003;**75**(10):1529-1533
18. Polshettiwar V, Varma RS. Green chemistry by nano-catalysis. Green Chemistry. 2010;**12**:743-754
19. Pollution Prevention by Utilizing Green Chemistry, Office of Compliance Assistance & Pollution Prevention, Fact sheet. 2006. p. 106