

مروری بر میکروراکتورها و روش‌های جدید کنترل آنها

حمید مثمري^۱، مسعود پیرهادی^۲، رضا داورنژاد^{۳*}

۱- کارشناس مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

۳- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

دریافت: ۹۱/۰۴/۱۲ پذیرش: ۹۱/۰۶/۲۵

چکیده

یک میکروراکتور^۱ یا راکتور میکروساختار یا راکتور میکروکانالی به دستگاهی گفته می‌شود که در آن واکنش‌های شیمیایی در مجراهایی با ابعاد زیر ۱ mm انجام می‌گیرد. تشدید فرایند (PI^۲) یکی از متداول‌ترین روشها در مهندسی شیمی و تکنولوژی کنترل میکروراکتورها به طور خاص، است. از زمان معرفی سیستم‌های تشدید فرایند (PIS^۳) و به خصوص سیستم‌های مینیاتوری^۴ تا به حال، کمبود منابع اطلاعاتی جامع در مورد این سیستم‌ها همواره محققین را دچار مشکل کرده است. در این مقاله با معرفی PIS از مبنا و گردآوری اطلاعات از منابع مختلف در زمینه میکروراکتورها و معرفی پتانسیل‌ها و معایب این نوع راکتورها و معرفی پتنت‌های ثبت شده در این مورد و اشاره به مشکل‌های موجود در مورد کنترل میکروراکتورها، یک بازبینی کامل در مورد میکروراکتورها و کنترل این سیستم‌ها انجام شده است.

واژگان کلیدی: میکروراکتور، کنترل، سیستم مینیاتوری، PIS، PI

مقدمه

واژه‌ی تشدید فرایند اولین بار در سال ۱۹۷۰، توسط کلیمن و رامشا ارائه شد. رامشا در میان سایرین، پیشگام در زمینه تشدید فرایند شد. در دو دهه‌ی اخیر تعاریف متفاوتی از این واژه ارائه شده است. کراس و رامشا تشدید فرایند را به صورت زیر تعریف کردند: «تشدید یا تقویت فرایند واژه‌ای است که برای توصیف استراتژی کاهش سایز واحد شیمیایی جهت دستیابی به محصول هدف استفاده می‌شود». مولین، در مقاله‌ای در ارتباط با PI، این طور بیان کرده است: "هر پیشرفت مهندسی شیمی

باتوجه به پیشرفت روز افزون علوم، تکنولوژی فرایند مناسب، موضوعی است که به شدت توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. به طور خلاصه، هدف، پیشرفت مجموعه تولیدات شیمیایی است به طوری که کمتر از منابع طبیعی استفاده کنند و به نوعی در مصرف مواد، صرفه‌جویی کنند. همچنین بی‌خطر بودن این تولیدات برای سلامت انسان یکی از پارامترهای اساسی در صنعت است.

* a-fazlali@araku.ac.ir

1. Microreactor

2. Process Intensified

3. Process Intensified System

4. Miniaturized System

مثال‌ها



شکل ۱- ابزارهای تشدید فرایند [۵]

برخی از آنها به مرحله ی تولید و اقتصادی شدن طرح رسیده‌اند. توجه به اهمیت میکروراکتورها از نظر پاسخ سریع به شرایط جدید فرایند، نیاز اندک به واکنش دهنده‌ها، حوزه گسترده شرایط عملیاتی و سیستم عملیاتی ایمن، با بازدهی بالا و سریع، ضروری است [۲]. به عنوان مثال یکی از کاربردهای مهم PI، در تکنولوژی انرژی و عملیات گازی، به ویژه در تحول سوختی در تولید هیدروژن در سلولهای سوختی است [۳].

که بر تکنولوژی کوچک تر، پاک تر و به لحاظ انرژی کارآمدتر تکیه داشته باشد، تشدید فرایند نامیده می‌شود [۱].

PI برای سنتزهای آلی و همچنین جهت پژوهش‌های ظریف شیمیایی هم در آزمایشگاه و هم در صنعت کاربرد دارد. با آزمایشات فراوانی که بر روی شرایط واکنش، پژوهش‌های سینتیکی و پیشرفت‌های فرایندی انجام شده است، گزارش‌های زیادی در مورد مطالعات نیمه صنعتی ارائه شده است و حتی

گسترش یافته است که می‌توان این محصولات را در ۲۶ بخش کلی تقسیم نمود [۶]. هر ساله گزارشات گسترده‌ای در تکنولوژی میکروراکتورها در کنفرانسهای بین‌المللی انتشار می‌یابد [۷-۱۳]. استفاده از میکروراکتورها باعث می‌شود که واکنش‌های شیمیایی راحت‌تر شناخته شوند [۱۴]. نسبت سطح به حجم بالای میکروراکتورها سبب می‌شود واکنش‌های شیمیایی با مواد بیشتر (انتقال جرم بیشتر) و انرژی بیشتر (انتقال حرارت بیشتر) انجام شود. همچنین این نسبت سطح به حجم بالا، سبب ارتباط بیشتر واکنش دهنده‌ها شده و در نتیجه واکنش شیمیایی با سرعت بیشتری انجام می‌شود. بنابراین زمان اقامت در میکروراکتورها نسبت به سیستم‌های مرسوم کمتر بوده و در نتیجه کنترل‌های مرسوم، برای کنترل این سیستم‌ها خیلی کند هستند [۱۴].

محققان معتقدند با استفاده از میکرو راکتورها حدود ۳۰٪ از تولیدات شیمیایی و دارویی، می‌توانند با بازدهی بیشتر تولید شوند. به علت ابعاد کوچک میکروراکتورها، واکنش سریع‌تر انجام می‌شود و کنترل واکنش آسان‌تر است. استفاده از میکروراکتورها، هزینه‌های تولید را به شدت کاهش می‌دهد. واکنش‌ها در این فضاهای کوچک می‌توانند خیلی با دقت کنترل شوند که این ویژگی میکروراکتورها سبب می‌شود واکنش‌ها در محیطی ایمن، پاک و البته با بازدهی بالا انجام شوند.

فواید استفاده از میکروراکتورها در تجهیزات با ابعاد میکرو:

- پاسخ سریع به شرایط جدید فرایند
- نیاز اندک به واکنش دهنده‌ها
- حوزه‌ی گسترده‌تر شرایط عملیاتی
- سیستم عملیاتی ایمن‌تر

تکنولوژی میکروراکتور و میکرو فرایند عمدتاً در آزمایشگاه‌ها و برای سنتز مواد آلی استفاده می‌شود و تحقیقات شیمیایی در مقیاس کوچک، هم در دانشگاه و هم در صنعت انجام شده است. پاتیکار و همکاران، با استفاده از تراشه سیلیکونی، میکروراکتوری را برای واکنش بازساخت^۵ متانل برای تولید هیدروژن طراحی کردند. این هیدروژن در میکروسلول سوختی

تشدید فرایند (PI)

PI را می‌توان به دو قسمت کلی تقسیم کرد.

۱- تشدید می‌گردد که به وسیله ابزار و تجهیزات صورت می‌گیرد و بیشتر به عنوان مینیاتوری کردن شناخته شده است. (مانند میکروراکتورها و میکرومیکسرها)^۱

۲- تشدید می‌گردد که به وسیله روش انجام می‌شود که بیشتر به عنوان یکپارچه سازی شناخته می‌شود، مانند راکتورهای یکپارچه شده^۲ [۱].

از مزایای PI می‌توان به کاهش قابل ملاحظه مقاومت انتقال جرم و گرما اشاره کرد که این یک مزیت چشمگیر است. به عنوان مثال در واکنش‌هایی که ماهیت انفجاری دارند، انتقال گرما و نبود مقاومت گرمایی مساله بسیار مهمی است. همچنین می‌توان به واکنش‌های پلیمریزاسیون (که یک فرایند با ویسکوزیته بالاست)، برای تاکید بر مزیت کاهش مقاومت انتقال جرم اشاره کرد [۴].

PI در واقع صنایع مهندسی شیمی را به سمت امنیت، سرعت و پاک‌ی توسعه می‌دهد. اما مساله مهم کنترل PIS است که متأسفانه اطلاعات کمی درباره کنترل این سیستم‌ها وجود دارد. در این مقاله علاوه بر معرفی میکروراکتورها به عنوان یک IS^۳ در دو شاخه PI (یکپارچه سازی و مینیاتوری کردن^۴)، روشهای جدید کنترل این سیستم‌ها را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱ انواع ابزارهای PI به صورت شماتیک به همراه مثال‌هایی از هر کدام نشان داده شده است [۵].

میکروراکتورها:

میکروراکتورها به طور کلی شامل شبکه‌ای از کانالهای میکروسایز هستند (در مجموع ۱۰-۳۰ mm) که روی زیر لایه جامد نشانده شده اند. کاربرد میکروراکتورها در دو دهه اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است. از مهمترین علت‌های تلاش برای جایگزینی این سیستم‌ها به جای سیستم‌های مرسوم، رسیدن به شرایط عملیاتی خاص به خصوص دما و فشارهای بالا است. در سالهای اخیر بازار فروش میکروراکتورها به اندازه‌ی

1. Micromixer
2. Integrated Microreactor
3. Intensified System

4. Miniaturized
5. Reforming

ضد زنگ و سیلیکون ساخته می‌شوند. در شکل ۴ چند نمونه از میکروراکتورهای شرکت‌های مختلف آورده شده است. تکنولوژی ساخت و ویژگی‌ها و فواید و خواص جنس‌های مختلف میکروراکتورها در جدول ۱ آمده است.

پتنت‌های ارائه شده در زمینه‌ی میکروراکتورها و میکرو فرایندهای مهندسی

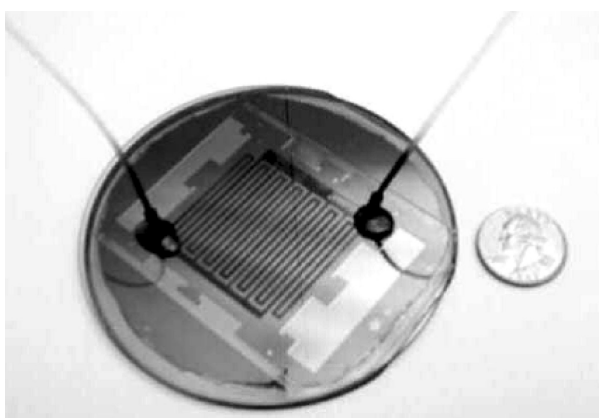
تکنولوژی میکروراکتور برای اقتصادی شدن حرکت رو به جلویی را آغاز کرده است. پتنت‌ها تنوع زیادی را منعکس می‌کنند که در طرحها و فرایندها بدست آمده‌اند. با وجود تحقیقات زیاد انجام شده در زمینه‌ی تکنولوژی میکروواکنش، مالکیت تکنولوژی هنوز در دست تعداد کمی از مخترعان و در

کاربرد دارد. بازدهی این سلول ۸۵-۹۰٪ و میزان تولید برق آن ۱۰۷-۸ بوده است [۳].

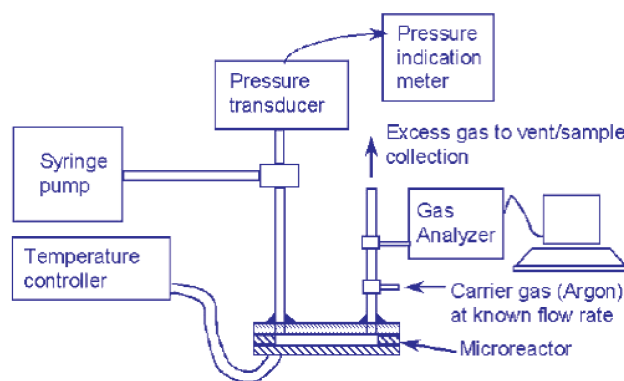
آنها با سوار کردن تجهیزاتی مانند سنسور دما و فشار، فیلتر کاتالیست و اتصالات میکروسیالی، بر روی تراشه میکروراکتور تلاش کردند تا تجهیزات مرسوم در راکتورهای غیر میکرو را بر این میکروراکتور اعمال کنند. نتیجه این کار کنترل و مانیتورینگ مناسب واکنش بود. شکل ۲ مجموعه تجهیزات به کار رفته در این آزمایش را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز، تصویری از میکروراکتور ساخته شده توسط این گروه است.

تکنولوژی میکروراکتورها

میکروراکتورها از موادی مثل سرامیک‌ها، پلیمرها، استیل



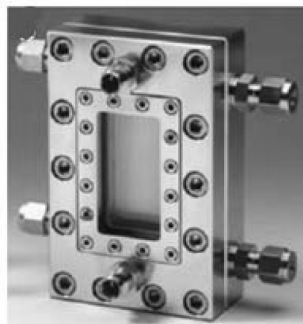
شکل ۳- تصویر میکروراکتور ساخته شده توسط پاتیکارو همکاران [۳].



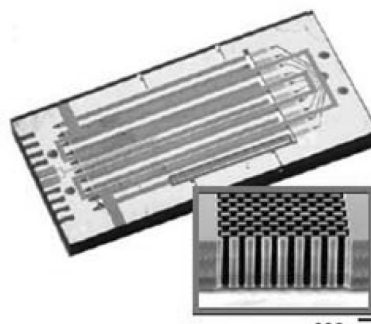
شکل ۲- شمای میکروراکتور و تجهیزات کنترل [۳].



الف



ب

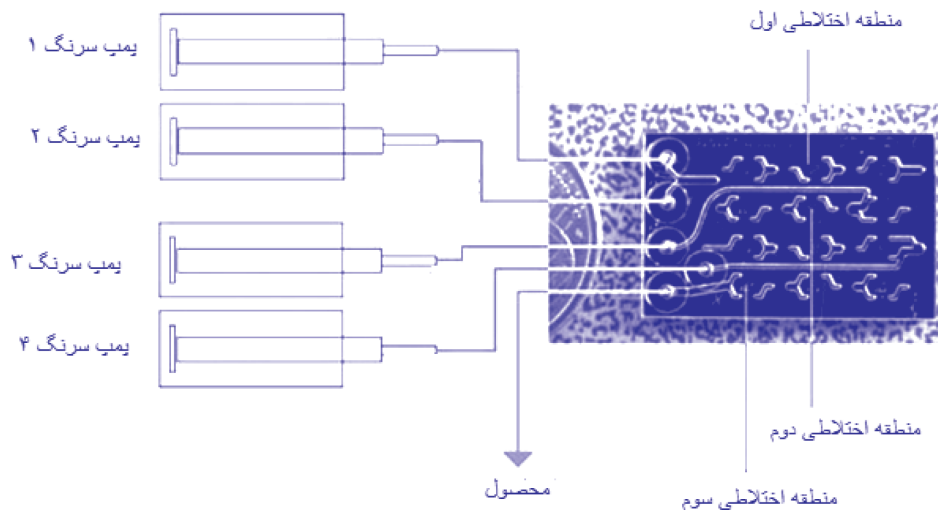


ج

شکل ۴- (الف) راکتور شیشه‌ای استفاده شده در سیستم جریان شیمیایی شرکت سیریس افریقا. (ب) راکتور فولاد ضدزنگ ساخته شده توسط موسسه میکرو تکنولوژی Mainz GmbH. (ج) میکروراکتور سیلیکونی چند کانالی با میله‌های پوشیده شده توسط کاتالیست پلاتین. [۱۵]

جدول ۱ - ساختار و ویژگی‌های میکروراکتورهای متنوع [۱۵]

مزایا	معایب	مواد	تکنولوژی ساخت
پایداری در دماهای بالا با اتلاف کم، مقاومت شیمیایی	هزینه ی تجهیزات بالا، انقباض پس از تولید	سرامیک	استرلیتوگرافی ^۱ ، تکنولوژی پودر و لیزر
مقاومت شیمیایی بالا، مشاهده ی مستقیم واکنش	ساخت به روش قلم زنی مشکل است، نامناسب در هوای مرطوب و مناسب در دمای معتدل	شیشه	فوتولیتوگرافی ^۲ ، پرتاب پودر ^۳ ، قلم زنی مرطوب ^۴ ، ماشین کاری به وسیله اولتراسونیک ^۵
ساخت سریع، قیمت پایین	ناسازگار با حلال‌های آلی، مناسب نبودن برای دما و فشار بالا	پلاستیک	لیتوگرافی نرم ^۶ ، تزریق
عملکرد در دما و فشار عملیاتی بالا، هدایت حرارتی خیلی بالا	نامناسب برای واسطه‌های اسیدی	سیلیکون	فوتولیتوگرافی، قلم زنی مرطوب و نرم
عملکرد در دما و فشار عملیاتی بالا	ناسازگاری اسیدی	استیل ضد زنگ	الکتروپلیتینگ ^۷ ، لیتوگرافی ^۸ ، کوبیدن، میکروماشین ^۹



شکل ۵- میکروراکتور برای سنتز پیوسته نانوذرات طلا [۱۷].

پایه سیلیکون انجام دادند که این سیستم قادر است به حالت آبی کنترل دمایی را در محدوده ی ۱۰۰-۲۰ درجه سانتی گراد انجام دهد. این آزمایش نشان داد که پلاتین یک کاتالیست موثر برای اکسیداسیون متانول در ۹۵ °C است. این سیستم در فرایند سلول سوختی کاربرد ویژه ای دارد [۱۶].

ساین و همکاران موفق به سنتز شیمیایی نانوذرات طلا در فرمت بسته^{۱۰} در یک میکروراکتور شدند که از مزایای

چند کشور جهان (عمدتاً آلمان، آمریکا، ژاپن و چین) است و این نشان میدهد فعالیتهای اقتصادی به صورت یکسان پخش نشده اند. هر چند ممکن است برای شرکتهای زیادی تکنولوژی میکروواکنش اهمیت داشته باشد، اما تلاشهای نسبی و اجرای کار در آنها یکسان نیست. پتنت‌های ژاپنی بیشتر روی تجهیزات تمرکز دارند.

آرویندان و همکاران مطالعاتی روی سیستم میکروراکتور

1. Stereolithography
2. Photolithography
3. Powder blasting
4. Wet etching
5. Ultrasonic machining

6. Soft lithography
7. Electroplating
8. Lithography
9. Micromachining
10. Batch format

اختلاط مایع در حجم‌های $100-10 \mu\text{m}$ و برای کروماتوگرافی انجام شده بود. این میکروراکتور برای اهداف آنالیزی کاربرد داشت. این ابزار اختلاط شامل یک پیوندگاه به شکل Y بود که این جریان دوباره به چند جریان مختلف تقسیم می‌شد. در واقع این سیستم ماهیت گردشی داشت و این عمل اختلاط و جداسازی تکرار می‌شد [۱۸].

یک پتنت هم از آکادمی علوم برلین در سال ۱۹۸۶ ارائه شده که به طور کلی دستگاه‌ها و سیستم‌های مهندسی شیمی ساخته شده با روش‌های ساده تولید را معرفی می‌کند. در واقع میکروکانال‌ها از آرایش پیل مانند صفحه‌ها ساخته شده‌اند مطابق شکل ۶ [۱۹].

در سال ۱۹۸۸ یک محقق به نام فیرلی یک پتنت در مورد راکتور کاتالیستی برای اکسیداسیون سوخته‌های کربن دار را به چاپ رساند. این راکتور حداقل شامل یک جزء کاتالیستی است که جریان داخل کانال به اندازه کافی، نسبت به ابعاد کانال کم است [۲۰].

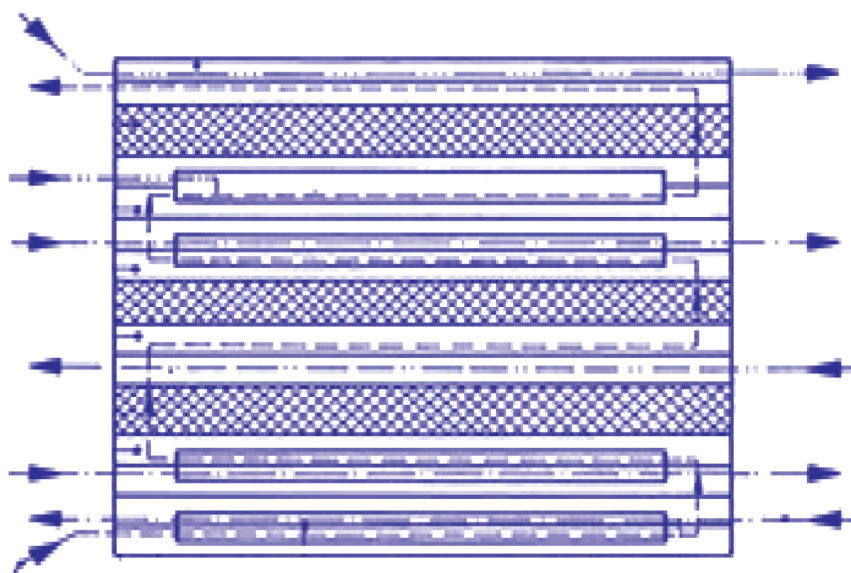
تجهیزات میکروراکتور در زمینه‌های مختلفی گسترش یافته‌اند، اما از برخی جنبه‌های مهندسی به لحاظ مصرف و تولید مواد و روش‌های تولید محدودند. شرکت کورنینگ در نیویورک یک دستگاه میکروراکتور را طراحی کرده که از شیشه یا شیشه-

این میکروراکتور، جریان پیوسته، مقدار کم حلال، واکنش سریعتر، اتلاف کمتر و کنترل بهتر این واکنش است. در شکل ۵ شماتیکی از این میکروراکتور آورده شده است.

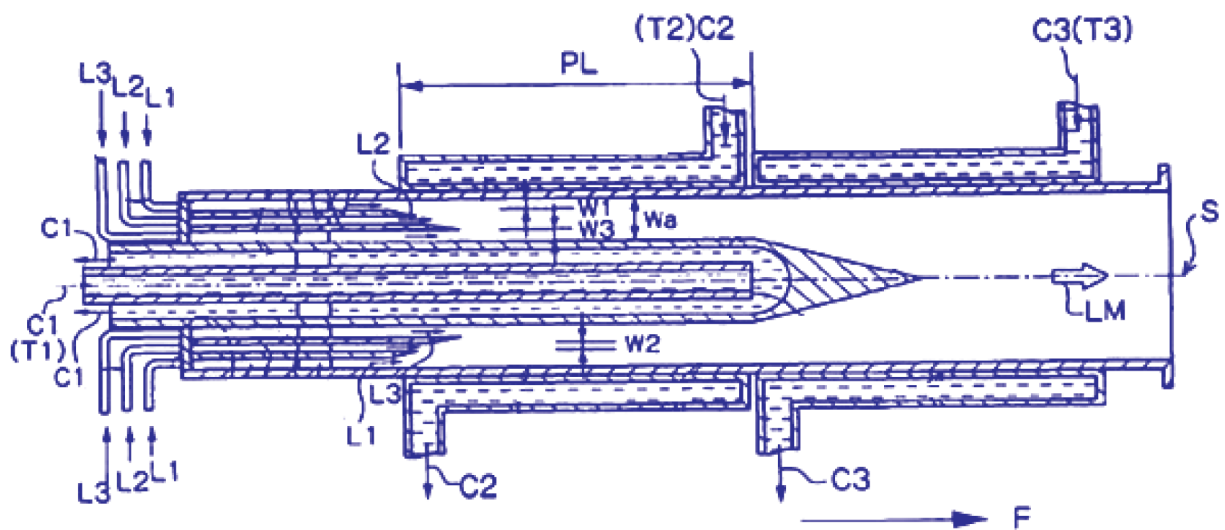
این میکروراکتور در واقع از یک میکرومیکسر تشکیل شده است. این میکرومیکسر از جنس سیلیکون و شیشه ساخته شده است. پهنای کانال این میکروراکتور $180 \mu\text{m}$ و عمق آن $530 \mu\text{m}$ است. این واکنش با واکنش دهنده‌های مختلفی انجام شده است که عبارت بودند از: اسید اسکویک (ویتامین C)، سولفات آهن (به عنوان یک عامل کاهنده)، پلی وینیل الکل، سدیم متاسیلیکات و تترا کلوییک اسید.

شدت جریان بین $1-50 \mu\text{l}/\text{min}$ بررسی و اعمال شد. شدت جریان توسط پمپ سرنگی تنظیم شده بود. زمان واکنش از چند ثانیه تا نیم ساعت انتخاب و بررسی شد و در نتیجه سایز نانوذرات با تغییر شدت جریان افزودنیها تنظیم شد. پوستر "سنتز نانوذرات طلا در دمای محیط با استفاده از میکروراکتور" برنده‌ی جایزه‌ی بهترین پوستر در کنفرانس بین‌المللی علوم نانو و نانوتکنولوژی در سال ۲۰۰۷ شد [۱۷].

پیش از این در سال ۱۹۷۷ الف آنیون اختراعی بر روی میکروماشین‌های مخلوط کن انجام داد. این اختراع در واقع برای



شکل ۶- سیستم پیل میکروراکتور با واکنش چندگانه حرارت دهی و عملیات جداسازی [۱۹].



شکل ۷- نمایی از برش طولی میکروراکتور مخلوط کننده چنداستوانه ای [۲۲].

فضای بسته (که با یک گاز پر شده) قرار می‌گرفت. این سیستم برای ایجاد یک منطقه ی بالا و پایین دمایی در کنار یکدیگر و ممانعت از تعادل دمایی آنها ابداع شده بود [۲۳].

موسسه ملی علوم و تکنولوژی صنعتی پیرفته در ژاپن یک دستگاه میکروراکتور با پاسخ دمایی سریع و یک راکتور با جریان فوق بحرانی بر پایه یک واحد با لوله‌های فشار بالای متعدد ایجاد کرد [۲۴]. در اختراع دیگری استفاده از ظرف‌های فشاری، برای تنظیم و هدایت فشار بالای آزمایشها در میکروراکتور، تعریف شده است [۲۵].

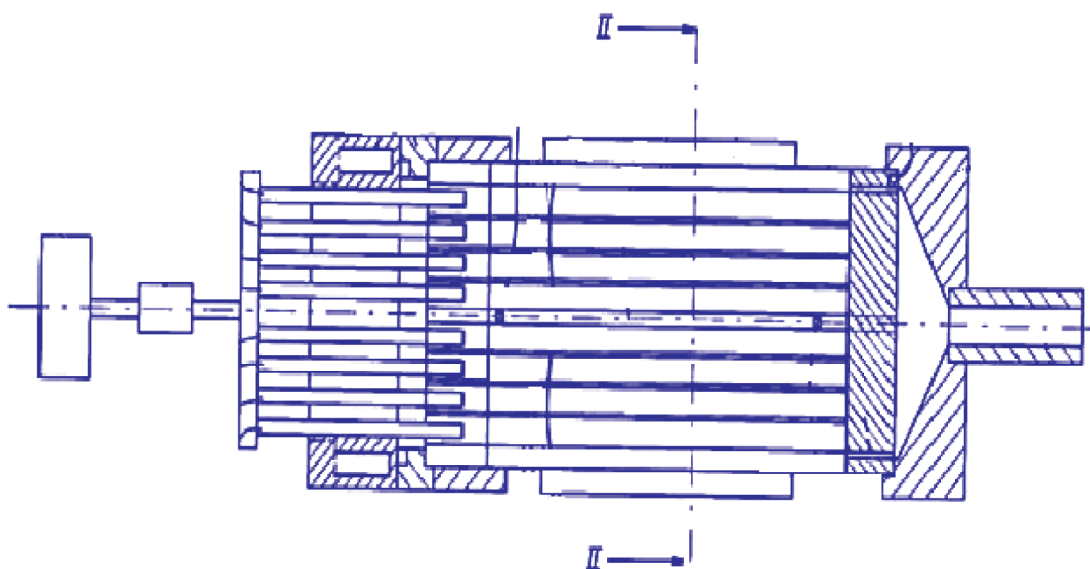
میکروراکتورهای کاتالیزری^۲

پتنتها برای میکروراکتورهای کاتالیزری به صورت عمده با روش بارگیری و جاگذاری کاتالیست سروکار دارند. یکی از موضوعات مهم برای میکروواکنشهای کاتالیزری مهندسی، داشتن راکتورهای آزمایشی برای یافتن کاتالیست خوب و دلخواه است. استفاده از راکتورهای کاتالیزری موازی، یکی از روشهای پیشنهاد شده در پتنتها است.

سرامیک با تیغه حرارتی ساخته شده و شامل یک گذرگاه سیال واکنش‌دهنده و یک زیر گذرگاه برای اختلاط، است [۲۱]. طرح دیگری که شرکت فیلم و عکس فوجی در ژاپن جزئیات آن را منتشر کرد، روش جدیدی برای ایجاد یک کانال طویل واکنش، در فرمتی فشرده بود. این راکتور شامل مجموعه ای از مخلوط کننده‌های چنداستوانه ای است که در نهایت به یک کانال واکنش منتهی می‌شوند. کاربری اصلی این راکتور، ساخت ذرات توسط واکنش‌های رسوب دهنده بوده است. بنابراین برای به تاخیر انداختن رسوب و کاهش زمان بسته شدن کانال، یک سیال بی اثر بین دو لایه در حال واکنش قرار داده شده است تا مسیر نفوذ افزایش پیدا کند. امکان پذیری این طرح برای تشکیل نقره کلرید بررسی شد و زمان بسته شدن کانال برای این مورد ۳۰ دقیقه بود. در حالی که یک میکرومیکسر استاندارد بدون وجود جریان بی اثر در ۴ دقیقه بسته می‌شد [۲۲]. در شکل ۷ نمایی از برش طولی این میکروراکتور آورده شده است. شرکت فوجی زیراکس در ژاپن راکتوری ابداع کرد که یک فضای محدود خلاء به وسیله عایق بندی در کنار یک

1. Response

2. Catalytic Microreactors



شکل ۸- راکتور کاتالیستی موازی با صفحات میکروکانالی در بدنه راکتور [۲۶].

نیاز است. فورچونگ کارلسروهه در آلمان، یک میکروراکتور برای تماس دو فاز (گاز- مایع یا مایع- مایع) ساخته است که فازها به وسیله ی یک گذرگاه میکروکانال به هم متصل می‌شوند. کاتالیست نیز می‌تواند به شکل بستر ثابت در این نوع استفاده شود [۲۸].

در دانشگاه صنعتی آینده‌پون یک ایده برای راکتور کاتالیستی ارائه شد. این راکتور در بخش داخلی (برای توزیع بهتر جریان) شکل خاصی داشت و شامل قسمت‌های مختلفی شامل میکرو کانال صاف و کوچک در بدنه راکتور بود. [۲۶]. مطابق شکل ۸.

شرکت تکنولوژی محور سیمیکس در امریکا، پتنت یک سیستم واکنشی با جریان موازی را ثبت کرده است که شامل چهار یا تعداد بیشتری کانال واکنشی است و از آن برای بهینه سازی واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. این سیستم قابلیت توزیع جریان را دارد و در نتیجه شدت جریان‌های مختلفی ایجاد میکند.

این سیستم شامل یک زیرسیستم^۱ تقسیم فشار و یک زیرسیستم تولید جریان با درصد اجزای مختلف (به وسیله محدود کردن جریانها) است [۲۷].

کنترل PI

مشکلات کنترل PI

کنترل PI با مشکلاتی روبروست که عمده گزارشات و تلاش‌های بدست آمده برای غلبه بر این مشکلات است. سیستم‌های تشدید یافته با مشکل پیچیدگی روبرو هستند و سیستم‌های مینیاتوری به خاطر زمان اقامت کم و سرعت بالای واکنش به پاسخگویی سریع نیاز دارند که همین موضوع کنترل این سیستم‌ها را با مشکل روبرو کرده است [۲۹].

مشکلات ابزاری

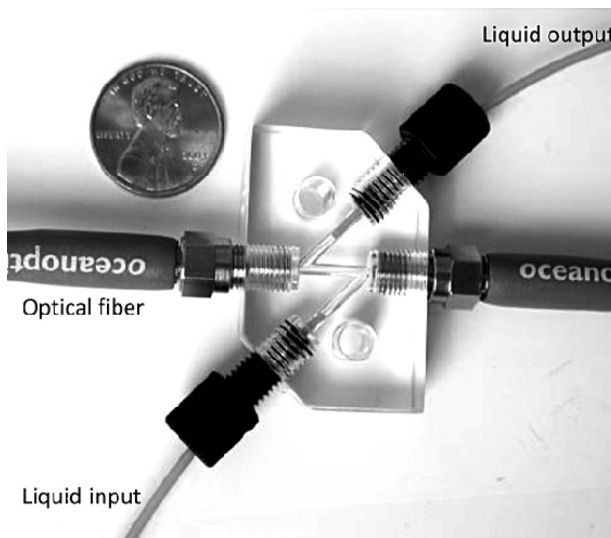
به عنوان مثال از شیرهای معمول و مرسوم نمی توان برای کنترل IS استفاده کرد و اگر از چند شیر موازی استفاده شود

میکروراکتورهای چندفازی

دستیابی به چند فاز نیازمند وسایل و تجهیزات داخلی خاصی است که اغلب برای ساخت، به جزئیات طراحی خاصی

1. Sub-system

شبه سازی‌های مقاله برزین و همکاران مشخص و اثبات شده است [۳۲]. کنترل IS به کار زیادی نیاز دارد در غیر این صورت این سیستم‌ها نمی‌توانند اقتصادی باشند [۲۹]. همانطور که قبلاً گفته شد اطلاعات خیلی کمی در زمینه کنترل IS وجود دارد. ما در اینجا به چند مورد از کنترل سیستم‌های مینیاتوری تشدید یافته اشاره می‌کنیم. اخیراً برزین به همراه همکارانش روش جدیدی را برای کنترل سیستم‌های مینیاتوری پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله، او به همراه همکارانش روش طیف سنجی را برای کنترل ویژگی‌های واکنش در فرایند بررسی کرده است [۳۲] که البته قبلاً این روش برای موارد دیگر نیز بررسی شده است مانند PH آب دریا [۳۳ و ۳۴] و آب تازه [۳۵] و در زمینه داروسازی و بررسی آن [۳۶]. علت این استفاده دقت بالای این روش اندازه‌گیری است که در واقع به کالیبراسیون نیاز ندارد [۳۷]. وی در مقاله خود به این نکته اشاره می‌کند که اندازه‌گیری سیستم‌های مینیاتوری باید خیلی سریع باشد چرا که زمان فرایند در این سیستم‌ها خیلی کم است و دستگاه‌های اندازه‌گیری با ثابت زمانی ده‌ها ثانیه برای اندازه‌گیری صحیح این سیستم‌ها خیلی کند هستند.

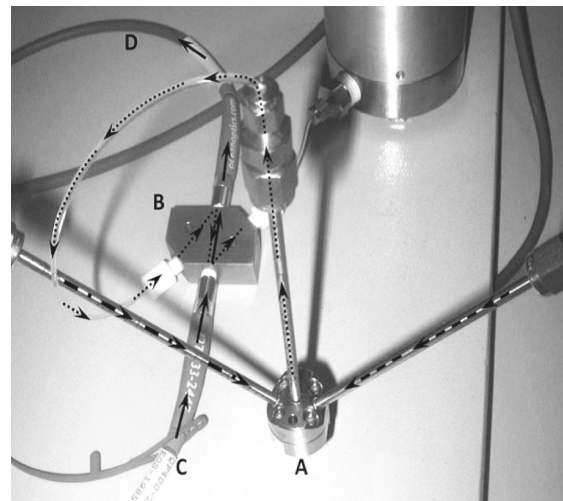


شکل ۱۰- میکرو جریان Z شکل عبوری از میان سلول با حجم داخلی $50 \mu\text{L}$ [۳۲].

غیر اقتصادی به نظر می‌رسد [۳۰]. در سیستم‌های مرسوم، دینامیک اجزای نهایی کنترلر در برابر دینامیک فرایند قابل چشم پوشی است اما این دینامیک سیستم‌های مرسوم، برای سیستم‌های مینیاتوری (در برابر دینامیک فرایند اجرایی سیستم‌های مینیاتوری) بسیار بزرگ است. بنابراین کنترلرهای مرسوم را نمی‌توان برای این سیستم‌ها بکار برد و این به خاطر زمان اقامت کوتاه این سیستم‌ها است که عمدتاً در حد جزئی از ثانیه تا چند ثانیه است [۲۹]. پالوینسکی و همکاران در سال ۲۰۰۱ به این نتیجه رسید که کنترلرهای دیجیتالی به اندازه کنترلرهای آنالوگ کاربرد ندارند [۳۱].

تأخیر زیاد

ثابت زمانی سیستم‌های مرسوم در حد دقیقه است اما این موضوع برای سیستم‌های مینیاتوری در حد ثانیه است و یا حتی کسری از ثانیه. حال اگر تاخیر زمانی واکنش را در نظر بگیریم که به خاطر انتقال مواد و انرژی است متوجه می‌شویم که تاخیر زمانی سیستم‌های مرسوم در مقایسه با ثابت زمانی آنها مناسب است اما در مورد سیستم‌های مینیاتوری این گونه نیست. تاخیر زمانی بزرگترین مشکل است که این مورد در



شکل ۹- (A) میکروراکتور جریان پیوسته. (B) سلول Z شکل. (C) فیبر نوری که نور مریبی را به سمت جریان سیال هدایت می‌کند. (D) نور جمع آوری شده که از میان جریان عبور کرده است [۳۲].

پیشرفت و توسعه سیستم‌های آنالیزی که از شیر چرخشی برای یکپارچگی عوامل مختلف در آن‌ها استفاده شده است، برای کاربردهای محیط زیستی تشریح شده است. این نوع، به آزمایشگاه روی شیر^۳ (در مقابل آزمایشگاه روی تراشه) معروف شده است [۴۱].

جنسن و همکاران طراحی یک میکروراکتور یکپارچه برای واکنش‌های کاتالیستی گازی را بررسی کردند. آنها واکنش اکسیداسیون متان و اکسیداسیون آمونیاک (برای واکنش روی فیلم کاتالیست پلاتین) را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که ابزار کنترل دستی برای سیستم‌های یکپارچه شده وجود ندارد چراکه این سیستم‌ها از بردهای الکترونیکی مختلفی ساخته شده اند بنابراین به روش انسان-ماشین^۴ نیاز هست [۴۲].

با توجه به اینکه سیکل‌های این سیستم‌ها سرعت بالایی دارند اداره ی تعداد زیاد سیگنال‌های ورودی و خروجی یک از چالش‌های مهم است ضمن اینکه بازدهی خوب سیستم نیز خیلی مهم است.

بخش سخت افزاری این سیستم کنترل شامل دو بخش کنترلر منطقی قابل برنامه ریزی و واصل انسان - ماشین است و بخش نرم افزاری آن برنامه کنترل PLC بود که در زبان G (زبان برنامه نویسی گرافیکی ابزارآلات بین المللی) با Labview ورژن ۶,۰۳ نوشته شده است [۴۲].

متأسفانه هیچ اطلاعات مستندی در مورد طراحی یکپارچگی اجزا وجود ندارد (مانند اتصالات داخلی جریان). بنابراین آنها با انجام طراحی‌های مختلف برای این سیستم‌ها و استفاده از روش‌های جدید برای کنترل این نوع، تلاش کردند به یک حالت بهینه برسند.

پنتت‌های مربوط به کنترل فرایند

پنتت‌های کنترل فرایند عمدتاً به داشتن استانداردهای سطح بالا در توزیع جریان و تضمین حفظ ویژگی‌های عملیات

برای انجام این اندازه گیری یک طراحی خاص برای طیف سنجی آن انجام شده است که در شکل (۹۱۰) نشان داده شده است. هردو واکنشگر وارد راکتور می‌شوند و محصول از بالای میکروراکتور تخلیه می‌شود و در نهایت برای طیف سنجی وارد یک سلول Z-Flow می‌شود که حجم کمی در حدود ۵۰ میکرو لیتر دارد و نور خروجی از منبع نور توسط فیبر نوری وارد Z-Flow می‌شود و توسط فیبر نوری این نور که از Z گذشته وارد ابزار طیف سنجی (که یک مبدل ۲ mHz است)، می‌شود و این ابزار به محقق اجازه می‌دهد که یک طیف کامل از نمونه داشته باشد. برای ثابت نگه داشتن شدت جریان، پمپ سانتریفیوژ با حداکثر فشار دشارژ ۶bar استفاده می‌شود. در این روش شدت جریان در حد ۱۴ml/min تقریباً ثابت نگه داشته می‌شود.

برای نشان دادن دقت اندازه گیری پیشنهاد شد پیک جذب برای رنج اسیدی و رنج بازی اندازه گیری شود. ماکزیمم جذب برای رنج اسیدی ۴۳۲ nm و برای رنج بازی ۵۸۸,۳ nm است که در مقایسه با مقادیر گزارش شده (به ترتیب ۴۳۲ nm و ۵۸۹ nm) خطای خیلی کمی را نشان می‌دهد که ممکن است علت این خطا، میله‌های شیشه ای PH متر باشد.

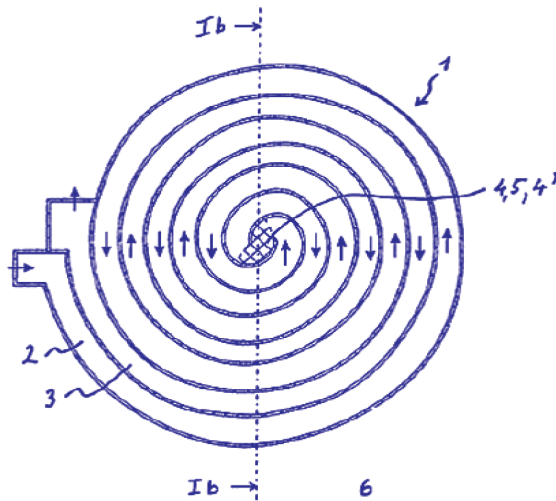
برای نشان دادن بازدهی بالای آن، PH از ۶ به ۷,۳ رسانده شد و تاخیر زمانی ۰,۷۵ s بود که وجود این خطا به علت مجموع زمان پاسخ پمپ و زمان تاخیر لوله‌های مرتبط کننده راکتور و وجود حباب‌های هوا است. با استفاده از این روش اندازه گیری، ثابت زمانی اندازه گیری به ۱۰ - ۵ ms می‌رسد [۳۲].

کنترل راکتورهای مجتمع شده

همان طور که گفته شد یکی از روش‌های PI مجتمع کردن سیستم‌ها است. مجتمع کردن راکتورها، سنسورها، میکسرها و مبدل‌های حرارتی در یک پلتفرم^۱ یکی از چالش برانگیزترین زمینه‌های PI است [۳۸ - ۴۰]. اصطلاح آزمایشگاه روی تراشه^۲ برای این مجتمع سازی‌ها استفاده می‌شود. اما اخیراً

1. Platform
2. Lab-on-a-chip

3. Lab-on-a-valve
4. Human-machine

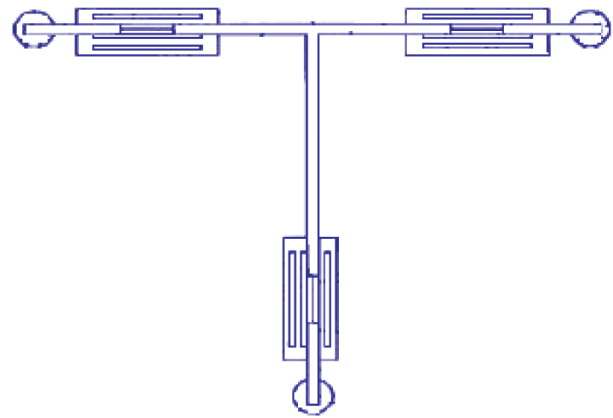


شکل ۱۲ - خوراک دهی به شکل مارپیچی و همسو، که از اتلاف حرارتی سطح واکنش جلوگیری می‌کند. [۴۷]

موسسه میکروتکنولوژی Mainz GmbH در آلمان یک ایده برای یکپارچه سازی در یک میکروراکتور برای غلبه بر اتلاف زیاد حرارتی (به ویژه در دمای بالا) پیشنهاد داد. در واقع این مزیت به خاطر نسبت سطح به حجم بالای این سیستم بود. واکنش دهنده‌ها / محصولات به شکل شعاعی یا مارپیچی به / از راکتور وارد / خارج می‌شوند تا در نهایت سطح واکنش در مرکز راکتور محدود شود. مطابق شکل ۱۲.

نتیجه گیری

در این مقاله مروری بر بخش کوچکی از تجهیزات میکروسیالی رایج، روشهای کنترل این تجهیزات به ویژه میکروراکتورها و همچنین روشهای خوراک دهی آنها انجام شد. محققان معتقدند که در حدود ۳۰٪ از تولیدات دارویی و شیمیایی رایج میتوانند با بازدهی بالاتری با بهره‌گیری از میکروراکتورها تولید شوند. این میکروراکتورها از لوله‌های کوچکی تشکیل شده‌اند که قطری در حدود چند میکرون میتوانند داشته باشند. واکنش در این فضاهای کوچک می‌تواند به دقت کنترل شود. که این امر آنها را ایمن تر، پاک تر و موثرتر می‌کند.



شکل ۱۱ - میکروراکتور با کانال‌های سطح مقطع متفاوت برای حرکت دادن جریان به وسیله نیروی الکترواسمتیک [۴۴].

مرتبط می‌شوند. شرکت میتسوی ژاپن توانست با یک ایده‌ی جدید نوسانات فشار یک جریان سیال در یک میکروراکتور را به کمتر از ۲٪ کاهش دهد. [۴۳] شرکت سیستم‌های شیمیایی میکروانگلستان استفاده از کانالهایی با سطح مقطع‌های مختلف^۱ تقسیم جریان بوسیله ی نیروی الکترواسمتیک^۲ را پیشنهاد دادند.

کانالهای کوچکتر بوسیله ی نیروی هیدرواستاتیک از حرکت مایع ممانعت می‌کنند. شکل ۱۱ شماتیکی از این میکروراکتور را نشان می‌دهد [۴۴].

شرکت پزشکی کونیکا و شرکتهای ژاپنی دیگر نظیر ناکاجیما و چند شرکت دیگر ایده ی خوبی پیشنهاد دادند تا مانع ورود هوا به جریان مایع شوند و که نتیجه آن دقت بالای زمان اختلاط و نرخ اختلاط و یا فشار بود [۴۵]. عدم تشکیل گاز از جریان مایع برای جلوگیری از توزیع هیدرودینامیک نیز ایده ای بود که توسط شرکت فیلم و عکس فوجی ارائه شد. [۴۶] آنها یک میکروراکتور با یک غشاء قابل نفوذ گاز را طراحی کردند. ویژگی این میکروراکتور، تخلیه گاز حاصل از یک واکنش مایع - مایع توسط گذرگاه میکرو جریان بود.

1. Different cross-sectional areas
2. Electro-osmotic

بی‌تردید استفاده از میکروراکتورها یکی از بهترین روش‌های تشخیص واکنش‌های شیمیایی است و لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه کاملاً واضح است. مهم‌ترین مساله در مورد این سیستم‌ها نحوه کنترل آنهاست، از آنجایی که سیستم‌های مینیاتوری به خاطر زمان اقامت کم و سرعت بالای واکنش به پاسخگویی سریع نیاز دارند، همین موضوع کنترل این سیستم‌ها را با مشکل روبرو کرده است. اما با وجود کمبود اطلاعات و منابع معتبر و ثبت شده در زمینه کنترل این سیستم‌ها، با مقایسه سیستم‌های کنترلی موجود متوجه می‌شویم روش پیشنهاد شده به وسیله برزین و همکارانش دارای دقت، بازدهی و تاخیر زمانی کمی است و پاسخگویی چالش‌های موجود در کنترل سیستم‌های میکروساختار شیمیایی است.

به هر حال باید پذیرفت که میکروراکتورها موجودند و از خود پتانسیل‌هایی را نشان داده اند که منجر به ساخت تکنولوژی و فرایندهای شیمیایی شده است. همین امر موجب توجه بیش از پیش آنها شده است، موضوع مهمی که مطرح می‌شود کنترل میکروراکتورهاست، که یکی از موضوعات مهم مطرح شده در این زمینه، امکان بهره‌گیری از این تجهیزات در صنعت است، علاوه بر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه تنها عده‌ی کمی از این تحقیقات به تولید در ابعاد صنعتی رسیده است. به هر حال مطالعات فراوانی در این زمینه با بهره‌گیری از صدها و یا هزاران نمونه آزمایشگاهی انجام خواهد شد، که این امر نوید بهره‌گیری صنعت آینده از این تکنولوژی را میدهد.

منابع

1. Cross W.T., Ramshaw C., Process Intensification: Laminar Flow Transfer, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 64, no. 4, 1986, pp. 293-301.
2. Stankiewicz A., Re-engineering the Chemical Process Plant, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2004.
3. Ashish V.P., Mayuresh V.K., A Microreactor for Hydrogen Production in Micro Fuel Cell Applications, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.13, No.1, 2004, pp. 7-18.
4. Adrian T., Schoenmakers H., Boll M., Model Predictive Control of Integrated Unit Operations: Control of a Divided Wall Column, Chemical Engineering and Processing, Vol.43, No.3, 2004, pp. 347-355.
5. Keil F.J., Modeling of Process Intensification, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
6. Salomon P., Product-Technology Roadmap for Microsystems A Nexus Task Force Report, WTC Wicht Technologie Consulting: Berlin. Germany, 2005.
7. Ehrfeld W., Ed., Microreaction Technology: Proceedings of the 1st International Conference on Microreaction Technology; Springer-Verlag Publishers: Berlin, Germany, 1998.
8. Schütte R., Matlosz M., Renken A., Liauw M., Langer, O.-U., Presented at The Ninth International Conference on Microreaction Technology (IMRET 9), Potsdam/Berlin, Germany, 2006.
9. Kandlikar S. K., Ed., Proceedings of the 1st International Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM 2003), American Society of 8334 Industrial & Engineering Chemistry Research., Vol. 46, No. 25, 2007.
10. Proceedings of the 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM 2004), American Society of Mechanical Engineers, New York, 2004.
11. Proceedings of the 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM 2005), American Society of Mechanical Engineers, Canada, 2005.
12. Davies M., Ed., Proceedings of the 4th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM 2006), American Society of Mechanical Engineers, Ireland, 2006.
13. Kandlikar S. G., Ed., Proceedings of the ASME 5th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM 2007), Mexico, 2007.

14. Andreas F. , Thomas R. D. ,Ralf S. , Stefan, Sensors for Online Control in Microreactors, Sensor Magazine, Vol. 2, 2009, pp. 62-63.
15. Jonathan P, McMullen, Klavs F. J., Integrated Microreactors for Reaction Automation: New Approaches to Reaction Development, Annual Review of Analytical Chemistry, Vol.3, 2010, pp. 19-42.
16. Nallakkan S, Aravindan, Eric M. S., Microreactor Studies on the Effect of Temperature on the Reaction Pathways of Methanol Electro-oxidation on Pt Catalysts. Proceedings - Electrochemical Society, Volume PV 2002-31, 2005, pp. 541-549.
17. Singh, A. Khan Malek, C. Kulkarni, S. K., Gold Nanoparticle Synthesis at Room Temperature using Microreactor, Presented at International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies, India, 2007.
18. Bollet, C., FR2407019, 1979.
19. Loehder W., Bergann L., DD246257A1, 1986.
20. Pfefferle W. C., US5051241, 1991.
21. Guermeur C., Caze P., Woehl P., Nedelec Y., Themont J. P., EP1679115A1, 2006.
22. Mae K., Nagasawa H., EP1481725A1, 2004.
23. Tabata K., Yamada T., Takahashi M., Yamazaki Y., US20060140829A1, 2006.
24. Suzuki A., Arai K., Hatada K., Masuda Y., JP06061903, 2006.
25. Moreno M., Woehl P., EP1400280A1, 2004.
26. Mies M.J.M., Rebrov E.V., De Croon M.H.J., Schouten J.C., WO04073861A2, 2003.
27. Bergh S.H., Engstrom J.R., Guan S., Pinkas D.M., Self K.W., US20067150994, 2006.
28. Pfeifer, P., Haas-Santo, K., Schubert, K., EP1724010A2, 2006.
29. Barzin R., Abd Shukor S. R., Ahmad A. L., An Overview of Difficulties in Controlling Intensified Process, Asean Journal of Chemical Engineering, Vol. 7, No. 1, 2007, pp. 8-15.
30. Abd Shukor, S. R., Tham M. T. Performance Envelopes of Process Intensified Systems. Proceedings of International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Hong Kong, 2004.
31. Palusinski A. O., Vruidhula S., Znamirovski L., Humbert D, Process Control for Microreactors, Chemical Engineering Progress, 2001, pp. 60-66.
32. Barzin R., Abd Shukor S. R., Ahmad A. L., New Spectrophotometric Measurement Method for Process Control of Miniaturized Intensified Systems, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 146, No. 1, 2010, pp. 403-409.
33. Yao W., Byrne R.H., Spectrophotometric Determination of Fresh Water pH using Bromocresol Purple and Phenol Red, Environmental Science & Technology .Vol. 35, 2001, pp. 1197-1201.
34. Zhang H., Byrne R.H., Spectrophotometric pH Measurements of Surface Seawater at in-Situ Conditions: Absorbance and Protonation Behavior of Thymol Blue, Marine Chemistry, Vol. 52, 1996, pp. 17-25.
35. Maberly S.C., Diel, Episodic and Seasonal Changes in pH and Concentrations of Inorganic Carbon in a Productive lake, Fresh Water Biology. Vol. 35, 1996, pp. 579-598.
36. Meloun M., Burkonová D., Syrový T. , Thermodynamic Dissociation Constants of Silychristin, Silybin, Silydianin and Mycophenolate by the Regression Analysis of Spectrophotometric Data, Analytical Chemistry. Vol 486, 2003, pp. 125-141.
37. DeGrandpre M.D., Baehr M.M, Hammar T.R., Calibration-free Optical Chemical Sensors, Analytical Chemistry. Vol. 71, 1999, pp. 1152-1159.
38. Hessel V., Loewe H., Microchemical Engineering: Components, Plant Concepts, User Acceptances Part III. Chemical Engineering & Technology, Vol.26, No. 5, 2003, pp. 531-544.
39. Matlosz M., Multiscale Design: Methods and Tools for the Sustainable Chemical Industry of the Future; Plenary Lecture PL-1; The Fourth International Workshop on Micro Chemical Plants, Kyoto University, Japan, 2006.
40. Kockmann N., Micro Process Engineering Actual State and Challenges; Presented at the 4th International

- Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICNMM 2006), American Society of Mechanical Engineers, Ireland, 2006.
41. Miro´M., Hansen E. H., Miniaturization of Environmental Chemical Assays in Flowing Systems: The Lab-on-a-Valve Approach vis-a`-vis Labon- a-Chip Microfluidic Devices, *Analytical Chimica Acta*, 600 (1-2), 2007, pp. 46-57.
 42. Quiram D. J., Jensen K. F., Schmidt Martin A., Mills P. L., Ryley J. F., Wetzel M. D., Kraus D. J., Integrated Microreactor System for Gas-Phase Catalytic Reactions. 3. Microreactor System Design and System Automation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 46, No.25, 2007, pp. 8319-8335.
 43. Maekawa, H., Tamaya, H., JP016904, 2004.
 44. Haswell, S. J., McCreedy T., Skelton, V., Clive, C. J., Fletcher, P. D. I., EP1295634A2 2003.
 45. Higashino K., Sando Y., Nakajima A., Aoki Y., WO07052471, 2007.
 46. Mae, K., US2005207952, 2005.
 47. Ehrfeld, W., Löwe, H., Hessel, V., WO9944736A1, 1999.