

FOI Teknikutveckling och Trender

Nr 29 November 2006

Mikroreaktorer – kemiska minifabriker

Anna-Karin Tunemalm och Per Lind

Effektiv och säker tillverkning av kemikalier i miniatyranläggningar med *Micro Reactor Technology* (MRT) förutspås bli väl etablerat inom kemisk industri dom närmaste fem-tio åren. Storleken gör att riskabla kemiska processer och tillverkning av toxiska kemikalier blir säkrare och mer lätthanterlig. En tydlig slogan är *Numbering up, Not scaling up*. Istället för att utveckla en uppskalad process körs en mikroprocess flera gånger eller med flera parallellt. MRT har sin framtid främst vid framställning av substanser som handhas i relativt små volymer.

Utvecklingen av mikroreaktorer har medfört att det finns en viss oro för olagligt utnyttjande av tekniken för säker och effektiv tillverkning av kemiska stridsmedel. Dessutom skulle MRT ge upphov till andra, mer svåridentifierbara signaturer¹ för tillverkning av kemiska stridsmedel än vad man talar om idag.

¹ Med en signatur menas karaktäristiska kännetecken som kan indikera misstänkt tillverkning av massförstörelsevapen.

VAD ÄR EN MIKROREAKTOR?

Inom kemisk processindustri pågår ständigt arbete med att förbättra och effektivisera produktionen, både med avseende på ekonomi och på miljö. Detta har medfört en snabb utveckling av så kallad *Micro Reactor Technology* (MRT).

Denna mikroteknologi baseras på reaktorer som varierar i storleksordning från en vanlig tärning, ett kreditkort eller till vad som får plats på en laborationsbänk. Reaktorerna innehåller flödeskanaler med en diameter mellan ett tiotal mikrometer upp till en millimeter och med en totalvolym från några mikroliter till 15 milliliter.

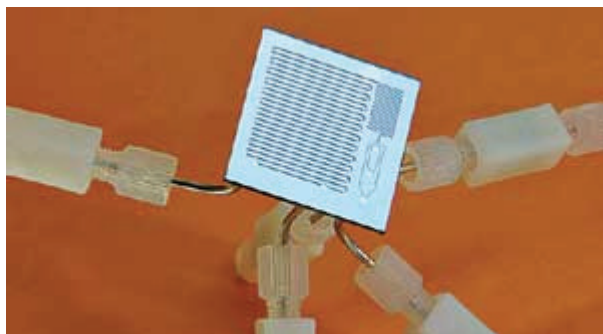


Bild 1. Denna reaktor som utvecklats vid **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, mäter 3x3 cm och innehåller en 43 cm lång flödeskanal. Tre ingångar tillåter tillsats av två reaktanter och en aktivator.

Fördelarna gentemot traditionell kemisk produktion är bland annat ökad säkerhet och effektivitet. Med andra ord ses en ljus framtid för denna teknik, främst vid framställandet av substanser som handhas i relativt små volymer. Genom att dessa små kemifabriker är så små är det möjligt att tillverka önskad kemikalie direkt på ort och ställe där den skall användas istället för att transportera den i många fall hälsovådliga kemikalien.

UTFORMNING OCH ANVÄNDNINGSSOMRÅDE

MRT och kemiska processsystem i miniformat har flera fördelar gentemot traditionella processtekniker varav den tunna innerdiametern är den viktigaste. Det gör att förhållandet mellan arean och volymen ökar drastiskt jämfört med en traditionell reaktor.² Detta leder till mycket effektivare värmeöverföring och blandning av reagerande ämnen och det i sin tur ger en process som är enklare att kontrollera och många gånger går betydligt snabbare. Med effektivare reaktionsförhållanden kan även bildandet av oönskade produkter hållas nere till ett minimum vilket förenklar uppreningen och dessutom ger en kostnadseffektivare process. Mindre reaktorer underlättar även reglering av temperatur och tryck. En stor nackdel med mikroreakortekniken är utfällningar som lätt kan sätta igen flödeskanalerna och att rengöra dessa kan vara problematiskt. Att skala ner kemiska reaktioner till mikrometerskala kan ge upphov till andra fysikalisk-kemiska och tekniska problem som till exempel okontrollerbar mixning på grund av de laminära flöden som erhålls i dessa små kapillärer jämfört med de turbulenta flöden som fås i makrosystem.^{3, 4}

² http://www.tiem.utk.edu/~gross/bioed/bealsmodules/area_volume.html,
<http://curriculum.calstatela.edu/courses/builders/lessons/less/les9/area.html>

³ <http://www.fluent.com/about/news/newsletters/02v1i12/a9.htm>,

⁴ A. Guenther, S.A. Khan, M. Thalmann, F. Trachsel, and K.F. Jensen, "Transport and Reaction in Microscale Segmented Gas Liquid Flow," *Lab-on-a-Chip*, (2004) **4**, 278.

De små reaktionsvolymerna har inte desto mindre många fördelar; säkerheten runt processen ökar och hälsoriskerna minskar. Även om ett läckage uppstår är mängderna så pass små att det går att ta hand om spill på ett säkert sätt.

Det finns flera olika typer av reaktorer att välja mellan beroende på vilka reaktionsbetingelser som önskas. Många reaktorer tål ett tämligen högt tryck, upp till 100 bar, medan andra är tillverkade för att klara extremt låga eller höga temperaturer. Beroende på reaktionsförhållanden, val av reaktor och design av processen kan genomflödet bli så högt som 100 ml/min. Som ett exempel kan nämnas att man i Kina lyckats producera nitroglycerin i en takt av 10 kg per timme med MRT.

Fram till idag har mikroreaktorer varit enbart prototyper och inte någon kommersiellt gångbar produkt. Under 2005 har denna teknik framgångsrikt producerat giftiga kemikalier som vätecyanid, fosgen och metylisocyanat. Ett forskningsområde som med stort intresse och framgång anammat denna teknik är tillverkning av biobränsle; våren 2006 lanserade en universitetsgrupp i USA en mikroreaktor stor som ett halvt kreditkort för produktion av biodiesel genom direkt blandning av alkohol och vegetabilisk olja. Genom att parallellkoppla ett större antal mikroreaktorer kan man på en yta av en resväska producera hundra till tusentals gallon⁵ diesel per år, tillräckligt för att försörja flera jordbruk utgående från råvaror från den egna gården.⁶

Det finns ett antal aktörer på marknaden som producerar utrustning för MRT. Som exempel kan nämnas BASF, Ehrfeld Microtechnik (se bild 2 och 3), MicroChemTec och CPC systems.



Bild 2. Ehrfeld Microtechnik har ett system där reaktorer, pumpar och värmeväxlare är utformade som moduler vilka kan arrangeras efter önskad utformning på en basplatta som visas på bilden intill. En enklare, fungerande uppställning som det på bilden intill kostar uppskattningsvis 0,5-1 miljon kronor.

Utvecklingen av MRT mot ännu mindre reaktorer går dock snabbt. Ett exempel är den reaktor som visas i bild 1.

⁵ 1 US gallon \approx 3,78 L

⁶ <http://www.gizmag.co.uk/go/5544/>

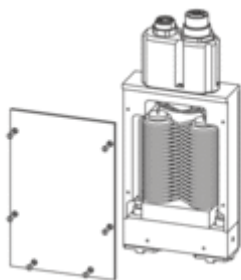


Bild 3. Exempel på en kapillärreaktor från Ehrfeld.

Hur användbar MRT är för produktion av större kvantiteter beror på hur lätt det är att framställa en betydande mängd kemisk substans på kort tid. Trots nanoliterskala är det ingen utopi. Ett system som genererar en produkt (antag en koncentration på 10 %) vid 200 $\mu\text{L}/\text{min}$ flöde ger 1,2 mL produkt/timme. 100 parallellkopplade reaktorer ger då 120 mL/timme, vilket är en hastighet jämförbar med många finkemiska processer.

HOT- OCH SKYDDSASPEKTER

Hotaspekter

Utvecklingen av mikroreaktorer som kommersiellt tillgängliga system anpassade för att på ett säkert sätt tillverka kemiska ämnen har gjort att denna processteknik även uppmärksammats säkerhetspolitiskt.⁷ I augusti 2005 publicerades en artikel i Science skriven av Tuan H. Nguyen⁸ rörande mikroreaktorers potentiella användande för tillverkning av kemiska stridsmedel.⁹ Han ville med denna artikel uppmärksamma OPCW¹⁰ och Australiengruppen¹¹ att de borde diskutera ett ställningstagande vad gäller utvecklingen av MRT, till exempel, bör Australiengruppen import/exportkontrollera handel med mikroreaktorer?

Skulle MRT som det förutspås bli tillgänglig för mer än bara specifika kemiska processer och för processkemister med specialistkunskap inom området, finns det risk att illvilliga stater och terrorister får ett verktyg i sin hand för tillverkning av kemiska stridsmedel och sprängämnen, som skapar mycket få signaturer¹ och med annat utseende än vad vi diskuterar ur ett hotperspektiv idag. Det finns även en viss fara att man istället för att importera prekursorer (utgångsämnen) för kemiska stridsmedel med denna teknik får en möjlighet att själv tillverka kemikalierna. Konsekvenserna av detta blir att spårbarheten av kemisk vapentillverkning minskar.

⁷ IUPAC Workshop: "Impact of Scientific Developments on the Chemical Weapons Convention", Bergen, Norge, 30 Juni-3 Juli 2002, Becker, E.D. Ed., *Pure Appl. Chem.* (2002) **74**, 229.

⁸ Nguyen arbetar på "Center for Global Security Research" som är en avdelning av Lawrence Livermore National Laboratory i Kalifornien och finansieras av US Department of Energy.

⁹ Nguyen, T. H. "Microchallenges of Chemical Weapons Proliferation", *Science*, (2005), 309, **5737**, 1021.

¹⁰ OPCW = Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons, organisationen för förbud mot kemiska vapen och styrande organ för Kemvapenkonventionens efterlevande (www.opcw.org).

¹¹ Australiengruppen (AG) är en informell sammanslutning med 38 länder representerade. Verksamheten syftar till att förhindra spridning av B- och C-vapen genom att de nationella exportrestriktionerna görs mer effektiva och överrensstämmande med de internationella konventionerna som förbjuder utveckling och produktion av massförstörelsevapen (www.australiagroup.net).

Att sätta begränsningar för utvecklingen av produkter som kan ha dubbel användning, s.k. PDA¹², i syftet att hindra missbruk av ny teknik utan att hindra det kreativa framåtskridandet och nytänkandet är en svår balansgång men något som likväl måste tas i beaktande, ett förhållningssätt som måste implementeras hos forskare och ingenjörer på universitet och företag.

Skyddsaspekter

Behovet av detektion i fält av kemiska och biologiska stridsmedel, såväl som explosivämnen, har i och med terroristhoten ökat. "Lab-on-a-Chip" utrustning som hanterar lösningar innehållande dessa ämnen i ett kanalnätverk i mikrometerskala för analytiska ändamål är ett område under stark utveckling.¹³ Den teknik och utrustning som används kan jämföras med MRT. Kunskapsframsteg inom bådafälten gagnar respektive vetenskapsområde. Exempelvis utnyttjar "Lab-on-a-Chip" utrustning elektrokinetisk transport (en kombinerad effekt av elektrofores och elektroosmos) för vätskeflöden och mixning av reagens och därmed kan externa pumpar och ventiler undvikas.

FÖRDJUPNINGSLÄSNING I ÄMNET

Fyra översiktartiklar om mikroreaktorteknik

Hessel, V., Löb, P., Löwe, H.; "Development of microstructured reactors to enable organic synthesis rather than subduing chemistry", **Curr. Org. Chem.** (2005) 9, 765.

Charpentier, J-C.; "Process Intensification by Miniaturization", **Chem. Eng. Technol.** (2005) 28, 255.

Watts, P., Haswell, S. J.; "The Application of Microreactors for Small Scale Organic Synthesis", **Chem. Eng. Technol.** (2005) 28, 290.

deMello, A. J.; "Control and Detection of Chemical Reactions in Microfluidic Systems", **Nature**, (2006) 442, 394.

¹² PDA - Produkt med dubbel användning är en produkt eller teknik, som utöver normalt bruk av civil natur kan användas vid utveckling eller tillverkning av massförstörelsevapen.

¹³ Joseph Wang, "Microchip devices for detecting terrorist weapons", *Analytica Chimica Acta*, (2004), **507**, 3.