a review

SOL GEL : PRINCIPLE AND TECHNIQUE

Yulia Mona Liza^{*1}, Rizka Chairani Yasin², Suci Sri Maidani², Rahadian Zainul²

¹Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

²Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

³Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Padang, Indonesia

⁴Physical Chemistry Laboratory, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*E-mail : yuliamona12@gmail.com, rizkachairaniy@gmail.com
sucisrimaidani@gmail.com, rahadianzmsiphd@yahoo.com

Abstrak. Metode sol gel merupakan salah satu metoda sintesis nanopartikel yang menerapkan 2 tahapan fasa penting yaitu sol dan gel. Tujuan review ini adalah untuk mengetahui prinsip dan teknik pada proses pembuatan sol gel. Prinsip metoda sintesis dengan teknik sol gel ini adalah pembentukan senyawa awal (prekursor) yang terdiri dari garam-garam organik atau senyawa metal organik, terjadinya polimerisasi larutan, terbentuknya, dan membutuhkan proses pengeringan dan kalsinasi untuk menghilangkan senyawa organik serta membentuk material anorganik berupa oksida. Beberapa material yang dihasilkan dengan menggunakan metode sol gel ini adalah *ceramic fibers, thin film coating, monolithic ceramics and glasses*.

Keywords : *sol gel, prinsip, teknik.*

1. Pendahuluan

Dalam pembuatan material(49) terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, salah satunya adalah dengan metode sol gel(14; 50-54). Metode sol gel ini banyak digunakan dalam pembuatan keramik(2; 4; 6; 16; 55-66) dan material gelas(67-69). Dengan menggunakan metode sol gel ini akan memungkinkan membentuk ukuran partikel skala nano(70-74) sekaligus membentuk penampakan morfologi yang homogen (1; 75). Sol merupakan suatu suspensi koloid dimana fasa terdispersinya berupa zat padat dan pendispersinya berupa zat cair. Sedangkan gel merupakan suatu zat yang memiliki pori semirigid yang terdiri dari jaringan kontinu dalam tiga dimensi yang terbentuk dari rantai polimer(76-78)

2. Metode

Pada proses sol gel dapat menghasilkan material dengan kemurnian dan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode lain. Proses sol gel berlangsung dalam beberapa tahapan yang dapat dilihat pada *fishbone* di bawah ini.

Bagan 1. FishBone sol-gel

Bagan 2. Road Maps Sol-gel

Keterangan

- 2000 Pembuatan Keramik Kordierit Dengan Metode Sol – Gel Dan Karakterisasinya
- 2007 Sintesa Nanokristal Mesopori TiO_2 Dengan Metoda Sol-Gel
- 2011 Sintesis Lapisan Tipis Nanokomposit TiO_2/CNT Menggunakan Metode Sol Gel Dan Aplikasinya Untuk Fotodegradasi Zat Warna Azo Orange 3R
- 2012 Sintesis Oksida $\text{Bi}_2\text{Fe}_x\text{V}_{1-x}\text{O}_{5,5-3x/2}$ Dengan Metode Sol Gel Dan Reaksi Kimia Padat
- 2013 Pengaruh pH, Suhu Dan Waktu Pada Sintesis LiFePO_4/C Dengan Metode Sol-Gel Sebagai Material Katoda Untuk Baterai Sekunder Lithium

- 2014 Penerapan Metode Sol Gel Dengan Variasi Temperatur Dan Waktu Kalsinasi Pada Sintesis Barium M-Heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)
- 2015 Sintesis Karakterisasi Zeolit X Dari Abu Vulkanik Gunung Belud Dengan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Metode Sol Gel

- 2016 Sintesis Nanopartikel PbS Melalui Metode Sol Gel Dengan EDTA Sebagai Capping Agent Synthesis Of PbS
- 2017 Sintesis Dan Karakterisasi Serbuk ZrSiO_4 Dengan Metode Sol Gel
- 2018 Sol-Gel synthesis of Silicon Doped Lithium Manganase Oxide with Enhanced Reversible Capacity and Cycling Stability

3. Hasil dan Pembahasan

a. Sejarah penggunaan metode sol gel

Sol-gel merupakan suatu istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan preparasi material keramik melalui beberapa tahapan yang meliputi pembuatan sol, gelasi sol, dan penghilangan fasa cair. Sol merupakan suatu suspensi koloid dimana fasa terdispersinya berupa zat padat yang masih mengalami *Brownian motion* (gerak Brownian) atau *diffusion Brownian* (difusi Brownian) dan pendispersinya berupa zat cair. Sedangkan gel merupakan suatu zat yang memiliki pori semirigid yang terdiri dari jaringan kontinu dalam tiga dimensi yang terbentuk dari rantai polimer. Metode sol-gel merupakan metode yang digunakan untuk membuat suatu material padat dari nonopartikel atau molekul yang berukuran kecil terutama digunakan untuk fabrikasi dari oksida logam seperti silikon(Si)(79) dan titanium(Ti)(80).

Pada tahun 1950, metode sol-gel dikembangkan untuk membuat bubuk radioaktif dari UO_2 dan ThO_2 untuk bahan bakar nuklir. Dengan menggunakan metode sol-gel ini akan menghasilkan bahan bakar tanpa generasi debu dalam jumlah besar.

Pada tahun 2000 metode sol gel digunakan pada pembuatan keramik kordierit(36). Penggunaan metode polimerisasi sol gel, khususnya pembuatan elektrokeramik multi komponen sangat menguntungkan dari segi material yang dihasilkan. Keuntungan penggunaan metode sol gel dalam pembuatan keramik ini akan menghasilkan homogenitas dan kemurnian yang tinggi, prosesnya juga berlangsung pada suhu rendah. Faktor yang mempengaruhi proses sol menjadi gel adalah pH, perbandingan air, alkoksida, jenis pelarut dan konsentrasi, serta suhu dari alkoksida.

Pada tahun 2007, metoda sol-gel digunakan untuk mensintesa Nanokristal Mesopori(40) TiO_2 . Sintesis TiO_2 menggunakan alkohol sebagai pelarut dan juga *block polymer*. TiCl_4 digunakan sebagai prekursor yang lebih mudah didapatkan dibandingkan titanium alkoksida. Larutan akan bersifat asam karena adanya HCl (81) akibat reaksi TiCl_4 dengan alkohol. Karakteristik *self assembly* dari *block copolymer* akan menghasilkan nanokristal TiO_2 (82) dengan struktur mesopori.

Pada tahun 2011, metode sol-gel digunakan untuk sintesis nanokomposit TiO_2/CNT (37) sebagai material fotokatalis yang disintesis menggunakan metode sol gel melalui pendispersian TiO_2 merk komersial pada CNT. Struktur kristal dan morfologi lapisan tipis nanokomposit TiO_2/CNT dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM.

Tahun 2012, metoda sol-gel digunakan untuk sintesa oksida $\text{Bi}_2\text{Fe}_x\text{V}_{1-x}\text{O}_{5,5-3x/2}$ (42). Oksida BIFEVOX disintesis menggunakan metode SSR maupun dengan metode SG merupakan oksida berwarna coklat. Pola XRD oksida yang disintesis menggunakan metode SSR menunjukkan bahwa intensitas puncak cenderung turun dengan kenaikan konsentrasi ion besi. Pada metode SG pola XRD-nya masih menunjukkan adanya ketidakmurnian pada oksida BIFEVOX, yaitu masih adanya fasa BiVO_4 dan $\text{Bi}_8\text{V}_2\text{O}_{17}$ sebagai fasa sekunder. Perbedaan oksida BIFEVOX yang disintesis menggunakan metode SSR dan SG adalah kehomogenan oksida yang dihasilkan.

Pada tahun 2013, metode sol-gel digunakan untuk sintesis LiFePO_4/C (47) sebagai material katoda baterai sekunder litium. Bahan pembentuk LiFePO_4 adalah serbuk Li_2CO_3 , $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Asam sitrat digunakan sebagai sumber karbon pada material katoda LiFePO_4 . Parameter yang diukur pada sintesis LiFePO_4/C adalah nilai keasaman (pH), suhu dan waktu sinter. Metode sintesis sol-gel menawarkan keuntungan menghasilkan ukuran partikel yang optimum dan menjaga kemurnian fasa. Pada sintesis LiFePO_4/C ini menggunakan pelarut berupa akuades sehingga menghasilkan partikel dengan morfologi yang baik dan homogen.

Selanjutnya tahun 2014, penggunaan metode sol-gel berkembang pada sintesis Barium M-heksaferit ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) (39). Tahap awal pembuatan ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) adalah membuat $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ yang dilarutkan dalam HNO_3 14,7 M dan diaduk selama 45 menit pada suhu 70°C sehingga diperoleh larutan ferit nitrat yang berwarna merah bening. Pada waktu yang sama serbuk

BaCO₃(83) dilarutkan dalam HNO₃ 8 M, ditambah H₂O dan diaduk selama 90 menit, sehingga diperoleh larutan barium nitrat yang berwarna bening. Kedua larutan dicampurkan pada suhu tertentu sehingga diperoleh sol Ba-Fe. Untuk menghasilkan gel makan sol Ba-Fe dikeringkan selama 7 hari. Kalsinasi pada suhu 600°C, teridentifikasi adanya tiga fasa yaitu BaFe₂O₄, α Fe₂O₃ dan γ Fe₂O₃. Sedangkan pada suhu 700-800°C sudah mulai terjadi transformasi fasa dan BaFe₁₂O₁₉ sudah dapat diamati meskipun tidak dominan dan akan mencapai fasa akhir pada suhu 1100°C. Tujuan dari kalsinasi pada sintesis BaFe₁₂O₁₉ ini adalah agar kation-kation penyusun fasa saling berikatan satu sama lain membentuk kristal. Pembentukan Barium M-Heksaferit dipengaruhi oleh suhu dan waktu kalsinasi. Metode sol-gel terbukti mampu menghasilkan bubuk Barium M-Heksaferit.

Pada tahun 2015, berkembang sintesis Zeolit X(44) pada metode sol gel. Zeolit adalah suatu material anorganik yang berpori berupa kristalin dengan struktur tetrahedral pada kerangka tiga dimensi dari SiO₄ dan AlO₄ yang dihubungkan satu sama lain dengan berbagi atom oksigen untuk membentuk intrakristalin. Sedangkan Zeolit X merupakan salah satu tipe zeolit. Zeolit X memiliki diameter α -cage (supercage) 13 Å dan diameter kerangka sodalit 6,6 Å dengan diameter pori 7,4 Å membentuk struktur tiga dimensi dan rasio $2 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 3$. Zeolit X yang disintesis melalui metode sol gel menggunakan bahan sintesis yaitu dari *water glass* sebagai sumber *silica* (84-87) dengan komposisi molar 4,5 Na₂O(88); Al₂O₃; 3 SiO₂; 315 H₂O(81) dan dari bahan alam sebagai sumber *silica*, dengan derajat kristalinitas dan kemurnian yang tinggi serta sintesis dilakukan satu tahap. Dalam sintesis zeolit X, terlebih dahulu dilakukan preparasi dan pencucian dengan menggunakan HCl 1M. Penggunaan HCl berfungsi untuk menghilangkan logam oksida dan non logam(89).

Seiring perkembangan zaman pada tahun 2016, metode sol-gel digunakan untuk sintesis nanopartikel PbS(48; 90). PbS ini dipreparasi dengan bahan yaitu SDS (0,05 mmol, 99,0%) dan EDTA (0,2 mmol, 99,0%) yang dilarutkan ke dalam 100 ml aquademin yang telah dipanaskan dengan *magnetic stirrer* selama 3-5 menit dan diukur pH larutan tersebut. Kemudian tambahkan NH₄OH, Pb(CH₃COOH) serta 20 ml NH₄S lalu *distirrer*, setelah homogen larutan didiamkan hingga mencapai suhu kamar dan disaring. Selanjutnya di oven selama 2-3 jam pada suhu 120°C dan dilakukan variasi konsentrasi EDTA. Dengan EDTA sebagai *capping agent* yang memiliki struktur yang baik dan menunjukkan kecenderungan meningkatkan ukuran partikel dan memperkecil energi celah pita PbS.

Pada tahun 2017, metode sol-gel digunakan untuk mensintesis serbuk ZrSiO₄(35; 91). Zirkon(52; 57; 92-96) merupakan material dalam industri keramik, yang diaplikasikan pada industri keamanan nuklir, mikroelektronik, proteksi lapisan dan bahan pengecoran logam. Zirkon memiliki gabungan senyawa zirkonia (ZrO₂) dan *silica* (SiO₂). Zirkon dapat dengan mudah dipisahkan dengan mineral berat karena nonkonduktor dan nonmagnetik. Pada sintesis zirkon, fase gel dihasilkan dari hidrolisis dan kondensasi dari reaksi metal prekursor alkoksida, dan kemudian dirubah menjadi xerogel dengan cara pengeringan. Untuk mendapatkan kehomogenan molekul, pada prekursor dilakukan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* di atas *hotplate stirrer ceramic*. Pada suhu 100°C, gel yang tersuspensi membentuk gel yang homogen, dan dilakukan pencucian sebanyak 15 kali pada pH 7 dengan tujuan membuang mineral pengotor. Gel yang telah mengendap akan dikeringkan sehingga menghasilkan serbuk ZrSiO₄ dan dilakukan pengujian XRF.

Pada tahun 2018 metode sol-gel berkembang pada sintesis Lithium Mangan Oksida Spinel (LiMn₂O₄)(38). Dengan serangkaian *silicon*(97-99) melalui proses sol gel, hasil XRD menunjukkan bahwa sampel *silicon* yang didoping dapat mempertahankan struktur spinel dari LiMn₂O₄. *Doping*(100; 101) *silicon* ini menggunakan *silicon* dengan tetraethoxysilan sebagai dopannya. Tahap awalnya yaitu lithium hidroksida stoikiometrik dan asam sitrat dilarutkan dalam air. Kemudian tambahkan larutan mangan asetat dan larutan campuran TEOS,

larutan etanol(66; 76; 102) ke dalam larutan yang tadi pada suhu 50°C. Untuk menyelidiki pengaruh konten *doping* Si pada kristal dari LiMn_2O_4 dapat dilakukan pengujian XRD(103; 104).

Dengan kemajuan teknologi yang semakin pesat setiap tahunnya, memungkinkan metode sol-gel ini digunakan pada pembuatan rompi anti peluru tembakan senapan dengan kaliber yang besar. Hal ini dikarenakan melalui metode sol ini mampu menghasilkan partikel dengan ukuran nano. Selain itu metode sol-gel ini juga dapat diterapkan untuk membuat mesin keramik pada mobil.

Metode sol gel terus berkembang dan yang dihasilkan sangat banyak mulai dari serbuk hingga padatan yang keras, secara umum metode sintesis nanopartikel ini melibatkan larutan sebagai mediana mengalami perubahan fasa menjadi sol (koloid yang mempunyai padatan tersuspensi dalam larutannya) dan gel (koloid tetapi mempunyai fraksi soloid yang lebih besar daripada sol)(105-111).

b. Tahapan proses sol gel

Pada umumnya, tahapan proses sol gel terbagi atas tiga bagian, yaitu hidrolisis, kondensasi alkohol, dan kondensasi air. Ada juga beberapa sumber yang mengatakan bahwasanya tahapan proses sol gel itu terbagi atas empat tahap, yaitu hidrolisis, kondensasi, *aging* atau pematangan, dan drying atau pengeringan(179-190).

1. Hidrolisis

Pada tahap hidrolisis terjadi reaksi penggantian gugus alkoksida(107; 112; 113) –OR oleh gugus karboksil –OH. Hidrolisis ini dapat terjadi dalam kondisi asam dan basa. Pada kondisi asam, gugus alkoksida akan terprotonasi dengan cepat. Misalnya, dengan menggunakan Tetraethyl orthosilicate(114) atau biasa disingkat dengan TEOS(115) yang merupakan alkoksida dari silikon, menyebabkan alkoksidanya akan lebih mudah diserang oleh H_2O . Hal ini dikarenakan TEOS tersebut akan mengambil kerapatan dari atom silikon yang mengakibatkan alkoksidanya bersifat elektrofilik. Proses tahapan sol gel dalam kondisi asam ini berjalan sesuai mekanisme $\text{S}_\text{N}2$ yang menghasilkan formasi *penta-coordinate transition state*. Mekanisme hidrolisis pada kondisi asam dapat dilihat pada reaksi di bawah ini :

Gambar 1. Mekanisme hidrolisis pada kondisi asam(8)

Dengan konsentrasi katalis yang sama, ternyata alkoksida silikon pada kondisi basa akan terprotonasi lebih lama dibandingkan dengan alkoksida silikon pada kondisi asam yang disebabkan oleh kecenderungan oksigen alkoksida untuk menolak gugus –OH. Mekanisme hidrolisis pada kondisi basa dapat dilihat pada reaksi di bawah ini :

Gambar 2. Mekanisme hidrolisis pada kondisi basa(8)

2. Kondensasi

Umumnya reaksi kondensasi ini akan terjadi sebelum reaksi hidrolisis selesai. Molekul yang sudah terhidrolisis akan membentuk ikatan siloksan (Si-O-Si), dua logam yang digabungkan melalui rantai oksigen(72; 91; 116). Reaksi kondensasi ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu kondensasi dalam suasana asam dan kondensasi dalam kondisi basa.

Pada kondisi asam silanol akan terprotonasi yang menyebabkan silikon lebih elektrofilik sehingga lebih mudah diserang oleh nukleofilik. Pada kondisi basa nukleofilik akan menyerang silanol yang terdeprotonasi pada asam silika netral menghasilkan ikatan siloksan. Mekanisme kondensasi dalam suasana asam dan basa dapat dilihat pada reaksi di bawah ini :

Gambar 3. Mekanisme kondensasi dalam suasana asam(46)

Gambar 4. Mekanisme kondensasi dalam suasana basa(46)

3. Aging (pematangan)

Pada proses pematangan ini, terjadi reaksi pembentukan jaringan gel yang lebih kaku, kuat, dan menyusut di dalam larutan. Fase cair yang masih mengandung partikel padat dan menggumpal akan terus bereaksi dan akan mengembun saat gel mengering. Gel yang dihasilkan sangat fleksibel. Gel tersebut akan semakin kental yang disebabkan oleh kelompok-kelompok cabang disampingnya yang mengembun. Hal ini menyebabkan cairan yang terdapat di dalam gel akan diserap oleh kelompok-kelompok cabang tersebut sehingga gel mengalami penyusutan. Proses ini akan terus berlanjut selama di dalam gel masih terdapat fleksibilitas(2).

4. Drying (pengeringan)

Fase cair atau pelarut yang tersisa perlu dihilangkan atau dibuang melalui proses *drying*(1; 2; 25; 26; 94; 117; 118) atau pengeringan yang disertai dengan penyusutan dan densifikasi. Ketika cairan dikeluarkan dari gel, ada beberapa hal yang mungkin terjadi. Apabila cairan dalam gel digantikan oleh udara maka akan terjadi perubahan besar pada struktur jaringan. Jika gel dikeringkan dengan penguapan maka jaringan gel akan runtuh dan menghasilkan *xerogel*(119; 120). Jika pengeringan terjadi pada kondisi superkritis, maka struktur jaringan dapat dipertahankan, dan akan membentuk gel dengan pori-pori(121) yang besar yang disebut *aerogel*(25; 26; 122; 123).

Pada proses penghapusan sisa pelarut tersebut sangat dipengaruhi oleh distribusi porositas dalam gel tersebut. Proses *drying* ini dilakukan dengan cara menguapkan larutan . untuk mendapatkan struktur sol gel yang memiliki luas permukaan yang tinggi maka cairan tidak didinginkan.

Untuk mendukung polikondensasi lebih lanjut dan untuk meningkatkan sifat mekanik serta stabilitas struktural gel, maka diperlukan proses pembakaran melalui tahap sintering akhir, densifikasi, dan pertumbuhan butir.

Untuk mendapatkan suatu prekursor(124-129) sol dengan kualitas yang baik, maka prekursor sol tersebut diletakkan di atas substrat yang akan menghasilkan sebuah film(105; 130-132) misalnya dengan *dip-coating*(133; 134) atau *spin coating*(135; 136) dengan cara dilemparkan ke dalam sebuah wadah yang sesuai dengan bentuk atau model yang kita inginkan misalnya keramik, gelas, dan *aerogels* . Metode sol gel ini dapat diterapkan dalam bidang optik, elektronik, energi, ruang, biosensor(137-141), serta obat.

c. Penerapan sol gel

Ada banyak produk-produk yang dapat dihasilkan melalui metode sol-gel ini. Para ilmuwan telah menggunakan metode ini untuk membuat bahan-bahan atau material yang ringan dan beberapa keramik yang paling sulit. Aplikasi sol-gel ini paling banyak pada pembuatan film tipis(94; 112; 142-144) yang dapat diproduksi di atas sepotong substrat dengan *spin-coating* atau *dip-coating*.

1. Film tipis dan serat

Dengan mengatur viskositas suatu larutan dalam suatu kisaran yang tepat, maka kita dapat menarik serat(13; 145-154) optik dan serat keramik tahan api yang dapat digunakan untuk sensor serat optik dan insulasi termal. Sehingga banyak ditemukan bahan keramik, baik dari kaca maupun dari kristal yang digunakan dalam berbagai bentuk dari komponen dalam keadaan padat seperti film, pelapis dan serat.

2. Serbuk nanoscale

Melalui presipitasi kita dapat membuat bubuk keramik ultrahalus(155; 156) dan seragam Bubuk dengan komposisi tunggal dan ganda dibuat dengan ukuran partikel skala nano yang dapat diaplikasikan pada gigi dan biomedis. Serbuk komposit(60; 121; 157-162) digunakan sebagai agrokimia dan herbisida. Bubuk abasif digunakan dalam berbagai *finishing* operasi. Metode sol-gel ini juga dapat digunakan untuk sintesis zeolit. Dengan metode sol-gel, elemen logam atau logam oksida akan mudah dimasukkan ke dalam produk atau hasil akhir dan sol silikat.

Produk lain yang dapat dibuat dengan metode sol-gel ini termasuk berbagai membrane keramik untuk *microfiltration*(163; 164), *ultrafiltration*, *nanofiltration*, *pervaporation*, dan *reverse osmosis*.

3. Opto-mechanical

Melalui rute sol-gel, dapat dibuat unsur optik makroskopis, komponen optik(70; 73; 74; 110; 113; 165-171) aktif serta cermin(172) luas area panas, lensa, dan pemisah berkas dengan cepat dan biaya yang dibutuhkan lebih rendah(173).

4. Obat

Alumina(92; 174; 175) yang dibuat menggunakan proses sol-gel dapat digunakan sebagai pembawa obat dan juga sebagai penyembuh luka.

Ada beberapa keunggulan dari teknik(91; 92; 134; 145; 157; 167; 176) sol gel diantaranya homogenitas hasil yang tinggi, senyawa yang dihasilkan memiliki kemurnian yang tinggi, dan suhu yang digunakan relatif rendah(177).

Diantara keunggulan dari teknik sol gel tadi, ada juga beberapa kelemahan dari teknik sol gel antara lain, prekursor yang digunakan mahal, waktu yang dibutuhkan lama, dan menghasilkan zat sisa berupa hidroksil dan karbon(178).

4. Kesimpulan

Berdasarkan literatur dapat disimpulkan bahwa proses sol gel merupakan metode sintesis nanopartikel dengan menggunakan dua tahapan fase yaitu sol dan gel. Sol merupakan suatu suspensi koloid dimana fasa terdispersinya berupa zat padat dan pendispersinya berupa zat cair. Sedangkan gel merupakan suatu zat yang memiliki pori semirigid yang terdiri dari jaringan kontinu dalam tiga dimensi yang terbentuk dari rantai polimer Metode sol gel akan menghasilkan suatu material berupa keramik, gelas. Dengan menggunakan metode sol gel ini akan memungkinkan membentuk ukuran partikel skala nano sekaligus membentuk penampakan morfologi yang homogen.

5. Referensi

1. Zemtsova EG, Arbenin AY, Yudintceva NM, Valiev RZ, Orekhov EV, Smirnov VM. 2017. Bioactive Coating with Two-Layer Hierarchy of Relief Obtained by Sol-Gel Method with Shock Drying and Osteoblast Response of Its Structure. *Nanomaterials* 7
2. Ben-Arfa BA, Salvado IM, Ferreira JM, Pullar RC. 2017. Novel route for rapid sol-gel synthesis of hydroxyapatite, avoiding ageing and using fast drying with a 50-fold to 200-fold reduction in process time. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 70:796-804
3. Mercade-Prieto R, Gunasekaran S. 2009. Alkali cold gelation of whey proteins. Part I: sol-gel-sol(-gel) transitions. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 25:5785-92

4. Pannier A, Mkandawire M, Soltmann U, Pompe W, Bottcher H. 2012. Biological activity and mechanical stability of sol-gel-based biofilters using the freeze-gelation technique for immobilization of *Rhodococcus ruber*. *Applied microbiology and biotechnology* 93:1755-67
5. Holder AJ, Badiei N, Hawkins K, Wright C, Williams PR, Curtis DJ. 2018. Control of collagen gel mechanical properties through manipulation of gelation conditions near the sol-gel transition. *Soft matter* 14:574-80
6. Zaidi NA, Tahir MW, Vellekoop MJ, Lang W. 2018. Design of Novel Ceramic Preconcentrator and Integration in Gas Chromatographic System for Detection of Ethylene Gas from Ripening Bananas. *Sensors* 18
7. Zhao YH, Zhang KC, Wang ZW, Huang P, Zhu K, et al. 2017. Comprehensive Study of Sol-Gel versus Hydrolysis-Condensation Methods To Prepare ZnO Films: Electron Transport Layers in Perovskite Solar Cells. *ACS applied materials & interfaces* 9:26234-41
8. Escobar S, Bernal C, Mesa M. 2015. Relationship between sol-gel conditions and enzyme stability: a case study with beta-galactosidase/silica biocatalyst for whey hydrolysis. *Journal of biomaterials science. Polymer edition* 26:1126-38
9. Donato RK, Lavorgna M, Musto P, Donato KZ, Jager A, et al. 2015. The role of ether-functionalized ionic liquids in the sol-gel process: effects on the initial alkoxide hydrolysis steps. *Journal of colloid and interface science* 447:77-84
10. Ozyilmaz E, Sayin S, Arslan M, Yilmaz M. 2014. Improving catalytic hydrolysis reaction efficiency of sol-gel-encapsulated *Candida rugosa* lipase with magnetic beta-cyclodextrin nanoparticles. *Colloids and surfaces. B, Biointerfaces* 113:182-9
11. Du T, Li H, Sant G, Bauchy M. 2018. New insights into the sol-gel condensation of silica by reactive molecular dynamics simulations. *The Journal of chemical physics* 148:234504
12. Wu J, Yuan J, Ye B, Wu Y, Xu Z, et al. 2018. Dual-Responsive Core Crosslinking Glycopolymer-Drug Conjugates Nanoparticles for Precise Hepatocarcinoma Therapy. *Frontiers in pharmacology* 9:663
13. Wu X, Liu A, Wang W, Ye R. 2018. Improved mechanical properties and thermal-stability of collagen fiber based film by crosslinking with casein, keratin or SPI: Effect of crosslinking process and concentrations of proteins. *International journal of biological macromolecules* 109:1319-28
14. Yang M, Liu W, Jiang C, He S, Xie Y, Wang Z. 2018. Fabrication of superhydrophobic cotton fabric with fluorinated TiO₂ sol by a green and one-step sol-gel process. *Carbohydrate polymers* 197:75-82
15. Xia W, Wu H, Xue P, Zhu X. 2018. Microstructural, Magnetic, and Optical Properties of Pr-Doped Perovskite Manganite La_{0.67}Ca_{0.33}MnO₃ Nanoparticles Synthesized via Sol-Gel Process. *Nanoscale research letters* 13:135
16. Chen QZ, Li Y, Jin LY, Quinn JM, Komesaroff PA. 2010. A new sol-gel process for producing Na₂O-containing bioactive glass ceramics. *Acta biomaterialia* 6:4143-53
17. Asaro F, Benedetti A, Freris I, Riello P, Savko N. 2010. Evolution of the nonionic inverse microemulsion-acid-TEOS system during the synthesis of nanosized silica via the sol-gel process. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 26:12917-25
18. He H, Xiao D, He J, Li H, He H, et al. 2014. Preparation of a core-shell magnetic ion-imprinted polymer via a sol-gel process for selective extraction of Cu(II) from herbal medicines. *The Analyst* 139:2459-66
19. Chang YC, Lee CY, Chiu HT. 2014. Porous inorganic materials from living porogens: channel-like TiO₂ from yeast-assisted sol-gel process. *ACS applied materials & interfaces* 6:31-5
20. Otsuka T, Maeda T, Hotta A. 2014. Effects of salt concentrations of the aqueous peptide-amphiphile solutions on the sol-gel transitions, the gelation speed, and the gel characteristics. *The journal of physical chemistry. B* 118:11537-45
21. Li X, Kong X, Wang X, Shi S, Guo G, et al. 2010. Gel-sol-gel thermo-gelation behavior study of chitosan-inorganic phosphate solutions. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft fur Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V* 75:388-92
22. Shang MY, Cao LH, Liu M, Luo X, Ren HB, et al. 2013. [Study on the preparation and properties of novel silica microporous antireflective coating by sol-gel process]. *Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu* 33:872-6

23. Seeni Meera KM, Murali Sankar R, Jaisankar SN, Mandal AB. 2013. Physicochemical studies on polyurethane/siloxane cross-linked films for hydrophobic surfaces by the sol-gel process. *The journal of physical chemistry. B* 117:2682-94
24. Rezaei A, Mohammadi MR. 2013. In vitro study of hydroxyapatite/polycaprolactone (HA/PCL) nanocomposite synthesized by an in situ sol-gel process. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 33:390-6
25. Kersen U, Keiski R. 2005. Characterization of La₂Mo₂O₉ aerogels synthesized by the sol-gel chemistry and high-temperature supercritical drying. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 5:1734-6
26. Kong Y, Jiang G, Fan M, Shen X, Cui S, Russell AG. 2014. A new aerogel based CO₂ adsorbent developed using a simple sol-gel method along with supercritical drying. *Chemical communications* 50:12158-61
27. Ganasen P, Khan MR, Kalam MA, Mahmud MS. 2014. Effect of visible light on catalytic hydrolysis of p-nitrophenyl palmitate by the Pseudomonas cepacia lipase immobilized on sol-gel support. *Bioprocess and biosystems engineering* 37:2353-9
28. Ungurean M, Paul C, Peter F. 2013. Cellulase immobilized by sol-gel entrapment for efficient hydrolysis of cellulose. *Bioprocess and biosystems engineering* 36:1327-38
29. Figueira JA, Sato HH, Fernandes P. 2013. Establishing the feasibility of using beta-glucosidase entrapped in Lentikats and in sol-gel supports for cellobiose hydrolysis. *Journal of agricultural and food chemistry* 61:626-34
30. Yilmaz E. 2012. Enantioselective enzymatic hydrolysis of racemic drugs by encapsulation in sol-gel magnetic sporopollenin. *Bioprocess and biosystems engineering* 35:493-502
31. Soares CM, de Castro HF, Itako JE, de Moraes FF, Zanin GM. 2005. Characterization of sol-gel bioencapsulates for ester hydrolysis and synthesis. *Applied biochemistry and biotechnology* 121-124:845-59
32. Liu DM, Troczynski T, Hakimi D. 2002. Effect of hydrolysis on the phase evolution of water-based sol-gel hydroxyapatite and its application to bioactive coatings. *Journal of materials science. Materials in medicine* 13:657-65
33. Cho MS, Kim BH, Hwang YM, Woo HG, Kim DH. 2006. Dry sol-gel condensation of p-X-C₆H₄SiH₃ (X = H, CH₃, CH₃O, F, Cl) to organosilica p-X-C₆H₄SiO₃ using nickelocene. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 6:3388-91
34. Pattier B, Henderson M, Brotons G, Gibaud A. 2010. Study of titanium oxide sol-gel condensation using small angle X-ray scattering. *The journal of physical chemistry. B* 114:5227-32
35. PUTRI ADC. 2017. SINTESIS DAN KARAKTERISASI SERBUK ZrSiO₄ DENGAN METODE SOL-GE.
36. Tursibadi s. 2000. Pembuatan Keramik Kordierit Dengan Metode Sol-Gel Dan Karakterisasinya
37. Rizky Bimanda Sakti AS, Heri Susanto. 2011. Sintesis Lapisan Tipis Nanokomposit TiO₂ CNT Menggunakan Metode Sol Gel Dan Aplikasinya Untuk Fotodegradasi Zat Warna Azo Orange 3R.
38. Huang S, Dakhchoune M, Luo W, Oveisi E, He G, et al. 2018. Single-layer graphene membranes by crack-free transfer for gas mixture separation. *Nature communications* 9:2632
39. I.Joni d. 2014. Penerapan Metode Sol-Gel dengan Variasi Temperatur dan Waktu Kalsinasi pada Sintesis Barium M-Heksaferit (BaFe₁₂O₁₉) *fisika dan aplikasinya* 10
40. Septina W. 2007. Sintesis Nanokristal Mersopori TiO₂ Dengan Metode Sol Gel.
41. Shea KJ, Loy DA. 2001. A mechanistic investigation of gelation. The sol-gel polymerization of precursors to bridged polysilsesquioxanes. *Accounts of chemical research* 34:707-16
42. Rolan Rusli IA, Aep Patah. 2012. Sintesis Oksida Bi₂Fex_{v1-xo5,5-3x2} Dengan Metode Sol Gel Dan Reaksi Kimia Padat.
43. Khalesi Moghaddam R, Goharpey F, Khademzadeh Yeganeh J. 2018. Interplay between phase separation and dewetting in PS/PVME thin films: effect of temperature. *Soft matter* 14:6684-95
44. Aditama SN. 2015. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit X dari Abu Vulkanik Gunung Kelud dengan Variasi Suhu Hidrotermal Menggunakan Metode Sol Gel.
45. Khakalo K, Baumgarten K, Tighe BP, Puisto A. 2018. Coarsening and mechanics in the bubble model for wet foams. *Physical review. E* 98:012607

46. Gabrielli L, Russo L, Poveda A, Jones JR, Nicotra F, et al. 2013. Epoxide opening versus silica condensation during sol-gel hybrid biomaterial synthesis. *Chemistry* 19:7856-64
47. Endah Yuniarti JT. 2013. Pengaruh pH, Suhu Dan Waktu Pada Sintesis Lifepo₄/C Dengan Metode Sol Gel Sebagai Material Katoda Untuk Baterai Sekunder Lithium.
48. Sari BT. 2016. SINTESIS NANOPARTIKEL PbS MELALUI METODE SOL-GEL DENGAN EDTA SEBAGAI CAPPING AGENT.
49. Atta NF, Hamed MM, Abdel-Mageed AM. 2010. Computational investigation and synthesis of a sol-gel imprinted material for sensing application of some biologically active molecules. *Analytica chimica acta* 667:63-70
50. Ramesh S, Kim HS, Lee YJ, Hong GW, Kim JH. 2017. Erratum to Nanostructured Silica/Gold-Cellulose-Bonded Amino-POSS Hybrid Composite via Sol-Gel Process and Its Properties. *Nanoscale research letters* 12:458
51. Xiumei H, Xin Y, Jianquan Q, Xiwei Q, Xiaoqiang W, et al. 2016. The Photoluminescence Properties of CaYAl₃O₇:Ce³⁺, Tb³⁺, Sm³⁺ Prepared by the Sol-Gel Process. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 16:730-3
52. Guo X, Song J, Lvlin Y, Nakanishi K, Kanamori K, Yang H. 2015. Preparation of macroporous zirconia monoliths from ionic precursors via an epoxide-mediated sol-gel process accompanied by phase separation. *Science and technology of advanced materials* 16:025003
53. Resende SF, Nunes EHM, Houmard M, Vasconcelos WL. 2014. Simple sol-gel process to obtain silica-coated anatase particles with enhanced TiO₂-SiO₂ interfacial area. *Journal of colloid and interface science* 433:211-7
54. Hofle S, Bruns M, Strassle S, Feldmann C, Lemmer U, Colsmann A. 2013. Tungsten oxide buffer layers fabricated in an inert sol-gel process at room-temperature for blue organic light-emitting diodes. *Advanced materials* 25:4113-6
55. Taira M, Okazaki M, Takahashi J. 1997. Characterization of 50wt%SiO₂-20wt%P₂O₅-30wt%CaO glass-ceramic powders prepared by the sol-gel process. *Dental materials journal* 16:117-26
56. Lee SS, Hong TW. 2014. Life Cycle Assessment for Proton Conducting Ceramics Synthesized by the Sol-Gel Process. *Materials* 7:6677-85
57. Beozzo CC, Alves-Rosa MA, Pulcinelli SH, Santilli CV. 2013. Liquid Foam Templates Associated with the Sol-Gel Process for Production of Zirconia Ceramic Foams. *Materials* 6:1967-79
58. Miao Y, Yang Z, Liang B, Li Q, Chen Q, et al. 2016. A novel in situ synthesis of SiBCN-Zr composites prepared by a sol-gel process and spark plasma sintering. *Dalton transactions* 45:12739-44
59. Wang J, Zhao H, Zhou S, Lu X, Feng B, et al. 2009. One-step in situ synthesis and characterization of sponge-like porous calcium phosphate scaffolds using a sol-gel and gel casting hybrid process. *Journal of biomedical materials research. Part A* 90:401-10
60. Milella E, Cosentino F, Licciulli A, Massaro C. 2001. Preparation and characterisation of titania/hydroxyapatite composite coatings obtained by sol-gel process. *Biomaterials* 22:1425-31
61. Ben-Arfa BAE, Fernandes HR, Miranda Salvado IM, Ferreira JMF, Pullar RC. 2018. Synthesis and bioactivity assessment of high silica content quaternary glasses with Ca: P ratios of 1.5 and 1.67, made by a rapid sol-gel process. *Journal of biomedical materials research. Part A* 106:510-20
62. Rezabeigi E, Wood-Adams PM, Drew RA. 2014. Synthesis of 45S5 Bioglass(R) via a straightforward organic, nitrate-free sol-gel process. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 40:248-52
63. Wang J, Shaw LL. 2009. Synthesis of high purity hydroxyapatite nanopowder via sol-gel combustion process. *Journal of materials science. Materials in medicine* 20:1223-7
64. Li FL, Zhang HJ. 2017. Synthesis of Hollow Sphere and 1D Structural Materials by Sol-Gel Process. *Materials* 10
65. Nakonieczny D, Paszenda Z, Drewniak S, Radko T, Lis M. 2016. sZrO₂-CeO₂ ceramic powders obtained from a sol-gel process using acetylacetone as a chelating agent for potential application in prosthetic dentistry. *Acta of bioengineering and biomechanics* 18:53-60
66. Liu DM, Troczynski T, Tseng WJ. 2001. Water-based sol-gel synthesis of hydroxyapatite: process development. *Biomaterials* 22:1721-30

67. Agustin-Saenz C, Machado M, Tercjak A. 2018. Antireflective mesoporous silica coatings by optimization of water content in acid-catalyzed sol-gel method for application in glass covers of concentrated photovoltaic modules. *Journal of colloid and interface science* 534:370-80
68. Ferrari JL, Limal KO, Maia LJ, Ribeiro SJ, Gomes AS, Goncalves RR. 2011. Broadband NIR emission in sol-gel Er(3+)-activated SiO₂-Ta₂O₅ glass ceramic planar and channel waveguides for optical application. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 11:2540-4
69. Li G, Nogami M, Abe Y. 1995. Defect formation and evolution in TeO₂-containing borosilicate glass films derived from a sol-gel process. *Physical review. B, Condensed matter* 51:14930-5
70. Rajamannan B, Mugundan S, Viruthagiri G, Praveen P, Shanmugam N. 2014. Linear and nonlinear optical studies of bare and copper doped TiO₂ nanoparticles via sol gel technique. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 118:651-6
71. Yahya N, Al Habashi RM, Koziol K, Borkowski RD, Akhtar MN, et al. 2011. Morphology and magnetic characterisation of aluminium substituted yttrium-iron garnet nanoparticles prepared using sol gel technique. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 11:2652-6
72. Herrera G, Montoya N, Domenech-Carbo A, Alarcon J. 2013. Synthesis, characterization and electrochemical properties of iron-zirconia solid solution nanoparticles prepared using a sol-gel technique. *Physical chemistry chemical physics : PCCP* 15:19312-21
73. Ricco R, Nizzero S, Penna E, Meneghello A, Cretaio E, Enrichi F. 2018. Ultra-small dye-doped silica nanoparticles via modified sol-gel technique. *Journal of nanoparticle research : an interdisciplinary forum for nanoscale science and technology* 20:117
74. Ba-Abbad MM, Kadhum AA, Mohamad AB, Takriff MS, Sopian K. 2013. Visible light photocatalytic activity of Fe(3+)-doped ZnO nanoparticle prepared via sol-gel technique. *Chemosphere* 91:1604-11
75. Zhang J, Nie J, Zhu X. 2018. Surface-Selective Grafting of Crosslinking Layers on Hydrogel Surfaces via Two Different Mechanisms of Photopolymerization for Site-Controllable Release. *Macromolecular rapid communications*:e1800144
76. Silva CR, Airoidi C. 1997. Acid and Base Catalysts in the Hybrid Silica Sol-Gel Process. *Journal of colloid and interface science* 195:381-7
77. Wang J, Wu Z, Wang G, Matyjaszewski K. 2018. In Situ Crosslinking of Nanoparticles in Polymerization-Induced Self-Assembly via ARGET ATRP of Glycidyl Methacrylate. *Macromolecular rapid communications*:e1800332
78. Catauro M, Tranquillo E, Illiano M, Sapio L, Spina A, Naviglio S. 2017. The Influence of the Polymer Amount on the Biological Properties of PCL/ZrO(2) Hybrid Materials Synthesized via Sol-Gel Technique. *Materials* 10
79. Catauro M, Papale F, Roviello G, Ferone C, Bollino F, et al. 2014. Synthesis of SiO(2) and CaO rich calcium silicate systems via sol-gel process: bioactivity, biocompatibility, and drug delivery tests. *Journal of biomedical materials research. Part A* 102:3087-92
80. Lourenco R, Linhares AAN, de Oliveira AV, da Silva MG, de Oliveira JG, Canela MC. 2017. Photodegradation of ethylene by use of TiO₂ sol-gel on polypropylene and on glass for application in the postharvest of papaya fruit. *Environmental science and pollution research international* 24:6047-54
81. Arif Yasthopi Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri. 2015. Photoelectrospinning Water for Hydrogen Production Using Illumination with Indoor Lights. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*
82. Zhu H, Jing Y, Pal M, Liu Y, Liu Y, et al. 2017. Mesoporous TiO₂@N-doped carbon composite nanospheres synthesized by the direct carbonization of surfactants after sol-gel process for superior lithium storage. *Nanoscale* 9:1539-46
83. Zainul R. 2018. Design and Modification of Copper Oxide Electrodes for Improving Conversion Coefficient Indoors Lights (PV-Cell) Photocells. *CC-BY Attribution 4.0 International*
84. Mayo EI, Poore DD, Stiegman AE. 2000. Catalysis of the silica sol-gel process by divalent transition metal bis(acetylacetonate) complexes. *Inorganic chemistry* 39:899-905
85. Chen Z, Hobo T. 2001. Chemically L-phenylalaninamide-modified monolithic silica column prepared by a sol-gel process for enantioseparation of dansyl amino acids by ligand exchange-capillary electrochromatography. *Analytical chemistry* 73:3348-57

86. Chen Z, Uchiyama K, Hobo T. 2002. Chemically modified chiral monolithic silica column prepared by a sol-gel process for enantiomeric separation by micro high-performance liquid chromatography. *Journal of chromatography. A* 942:83-91
87. Hamza K, Abu-Reziq R, Avnir D, Blum J. 2004. Heck vinylation of aryl iodides by a silica sol-gel entrapped Pd(II) catalyst and its combination with a photocyclization process. *Organic letters* 6:925-7
88. Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri Darajat. 2015. Modifikasi dan Karakteristik I-V Sel Fotovoltaik Cu₂O/Cu-Gel Na₂SO₄ Melalui Illuminasi Lampu Neon. *EKSAKTA Berkala Ilmiah Bidang MIPA*
89. Rahadian Zainul AA, Hermansyah Aziz, Syukri Arief, Syukri Darajat. 2015. Disain Geometri Reaktor Fotosel Cahaya Ruang. *Jurnal Riset Kimia*
90. Desy Kurniawati IL, Salmariza Sy Harmiwati, Zulkarnain Chaidir, Edison Munaf, Rahmiana Zein, Hermansyah Aziz, Rahadian Zainul. 2015. Biosorption of Pb (II) from Aqueous Solutions Using Column Method by Lengken (Euphoria logan lour) Seed and Shell. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*
91. Catauro M, Papale F, Bollino F, Gallicchio M, Pacifico S. 2014. Biological evaluation of zirconia/PEG hybrid materials synthesized via sol-gel technique. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 40:253-9
92. Madani A, Nakhaei M, Karami P, Rajabzadeh G, Salehi S, Bagheri H. 2016. Sol-gel dip coating of yttria-stabilized tetragonal zirconia dental ceramic by aluminosilicate nanocomposite as a novel technique to improve the bonding of veneering porcelain. *International journal of nanomedicine* 11:3215-23
93. Chepurna I, Smotraev R, Kanibolotsky V, Strelko V. 2011. Colloidal and chemical aspects of nanosized hydrated zirconium dioxide synthesized via a sol-gel process. *Journal of colloid and interface science* 356:404-11
94. Stawski TM, Veldhuis SA, Castricum HL, Keim EG, Eeckhaut G, et al. 2011. Development of nanoscale inhomogeneities during drying of sol-gel derived amorphous lead zirconate titanate precursor thin films. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 27:11081-9
95. Aronne A, Sannino F, Bonavolonta SR, Fanelli E, Mingione A, et al. 2012. Use of a new hybrid sol-gel zirconia matrix in the removal of the herbicide MCPA: a sorption/degradation process. *Environmental science & technology* 46:1755-63
96. Dhayal V, Chaudhary A, Choudhary BL, Nagar M, Bohra R, et al. 2012. Molecular precursors for the preparation of homogenous zirconia-silica materials by hydrolytic sol-gel process in organic media. Crystal structures of [Zr{OSi(O(t)Bu)₃}₄(H₂O)₂].2H₂O and [Ti(O(t)Bu){OSi(O(t)Bu)₃}₃]. *Dalton transactions* 41:9439-50
97. Zhang Y, Hu X, Wang SW, Zhang B, Shi L, et al. 2018. High transparent mid-infrared silicon "window" decorated with amorphous photonic structures fabricated by facile phase separation. *Optics express* 26:18734-48
98. Fonblanc D, Lopez-Ferber D, Wynn M, Lale A, Soleilhavoup A, et al. 2018. Crosslinking chemistry of poly(vinylmethyl-co-methyl)silazanes toward low-temperature formable preceramic polymers as precursors of functional aluminium-modified Si-C-N ceramics. *Dalton transactions*
99. Stotesbury T, Illes M, Wilson P, Vreugdenhil AJ. 2017. The application of silicon sol-gel technology to forensic blood substitute development: Mimicking aspects of whole human blood rheology. *Forensic science international* 270:12-9
100. Vishwas M, Narasimha Rao K, Arjuna Gowda KV, Chakradhar RP. 2012. Influence of Sn doping on structural, optical and electrical properties of ZnO thin films prepared by cost effective sol-gel process. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 95:423-6
101. Jun MC, Koh JH. 2013. Optical and structural properties of Al-doped ZnO thin films by sol gel process. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 13:3403-7
102. Wang Y, Zeng Z, Guan N, Cheng J. 2001. Sol-gel technique for the preparation of beta-cyclodextrin derivative stationary phase in open-tubular capillary electrochromatography. *Electrophoresis* 22:2167-72

103. Pinjari DV, Prasad K, Gogate PR, Mhaske ST, Pandit AB. 2015. Synthesis of titanium dioxide by ultrasound assisted sol-gel technique: effect of calcination and sonication time. *Ultrasonics sonochemistry* 23:185-91
104. Li H, Zhang Y, Wang S, Wu Q, Liu C. 2009. Study on nanomagnets supported TiO₂ photocatalysts prepared by a sol-gel process in reverse microemulsion combining with solvent-thermal technique. *Journal of hazardous materials* 169:1045-53
105. Zhong P, Que W, Zhang J. 2010. Fabrication of regular TiO₂ nanoporous films derived by combining nanoimprint technique with sol-gel method. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 10:7574-7
106. Wu Z, Cao Z, Zeng JL, Zhang L, Chu X, et al. 2010. A reusable capacitive immunosensor based on a CuS ultrathin film constructed by using a surface sol-gel technique. *Analytical sciences : the international journal of the Japan Society for Analytical Chemistry* 26:1001-6
107. Tatte T, Kolesnikova AL, Hussainov M, Talviste R, Lohmus R, et al. 2010. Crack formation during post-treatment of nano- and microfibres prepared by sol-gel technique. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 10:6009-16
108. Prasad K, Pinjari DV, Pandit AB, Mhaske ST. 2010. Phase transformation of nanostructured titanium dioxide from anatase-to-rutile via combined ultrasound assisted sol-gel technique. *Ultrasonics sonochemistry* 17:409-15
109. Prasad K, Pinjari DV, Pandit AB, Mhaske ST. 2010. Synthesis of titanium dioxide by ultrasound assisted sol-gel technique: effect of amplitude (power density) variation. *Ultrasonics sonochemistry* 17:697-703
110. Kamaruddin SA, Chan KY, Sahdan MZ, Rusop M, Saim H. 2010. ZnO microstructures and nanostructures prepared by sol-gel hydrothermal technique. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 10:5618-22
111. Dubey P, Choi SK, Choi JH, Shin DH, Lee CJ. 2010. High-quality thin-multiwalled carbon nanotubes synthesized by Fe-Mo/MgO catalyst based on a sol-gel technique: synthesis, characterization, and field emission. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 10:3998-4006
112. Shimizu W, Nakamura S, Sato T, Murakami Y. 2012. Creation of high-refractive-index amorphous titanium oxide thin films from low-fractal-dimension polymeric precursors synthesized by a sol-gel technique with a hydrazine monohydrochloride catalyst. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 28:12245-55
113. Shimizu W, Sato T, Matsumoto T, Murakami Y. 2012. Rapid synthesis of low-fractal dimension titanium oxide polymers by a sol-gel technique using hydrazine monohydrochloride. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 12:3732-8
114. Jeong HJ, Kim DK, Lee SB, Kwon SH, Kadono K. 2001. Preparation of Water-Repellent Glass by Sol-Gel Process Using Perfluoroalkylsilane and Tetraethoxysilane. *Journal of colloid and interface science* 235:130-4
115. Pipattanawarothai A, Suksai C, Srisook K, Trakulsujaritchok T. 2017. Non-cytotoxic hybrid bioscaffolds of chitosan-silica: Sol-gel synthesis, characterization and proposed application. *Carbohydrate polymers* 178:190-9
116. Catauro M, Bollino F, Papale F, Gallicchio M, Pacifico S. 2015. Influence of the polymer amount on bioactivity and biocompatibility of SiO₂/PEG hybrid materials synthesized by sol-gel technique. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 48:548-55
117. Wang B, Friess W. 2017. Spray drying of silica microparticles for sustained release application with a new sol-gel precursor. *International journal of pharmaceutics* 532:281-8
118. Pei L, Kurumada K, Tanigaki M, Hiro M, Susa K. 2005. Effect of drying on the mesoporous structure of sol-gel derived silica with PPO-PEO-PPO template block copolymer. *Journal of colloid and interface science* 284:222-7
119. Jun SH, Lee EJ, Yook SW, Kim HE, Kim HW, Koh YH. 2010. A bioactive coating of a silica xerogel/chitosan hybrid on titanium by a room temperature sol-gel process. *Acta biomaterialia* 6:302-7
120. Pohorilyi RP, Honcharyk VP, Kozhara LI, Zub Iu L, Chuiko OO. 2006. [Comparative characteristic of activity of urease, incorporated into polysiloxane hydrogels and xerogels, obtained by sol-gel technique]. *Ukrains'kyi biokhimichnyi zhurnal* 78:94-101

121. Chu SZ, Inoue S, Wada K, Li D, Haneda H, Awatsu S. 2003. Highly Porous (TiO₂-SiO₂-TeO₂)/Al₂O₃/TiO₂ Composite Nanostructures on Glass with Enhanced Photocatalysis Fabricated by Anodization and Sol-Gel Process. *The journal of physical chemistry. B* 107:6586-9
122. Bakierska M, Chojnacka A, Swietoslowski M, Natkanski P, Gajewska M, et al. 2017. Multifunctional Carbon Aerogels Derived by Sol-Gel Process of Natural Polysaccharides of Different Botanical Origin. *Materials* 10
123. Wei TY, Chen CH, Chien HC, Lu SY, Hu CC. 2010. A cost-effective supercapacitor material of ultrahigh specific capacitances: spinel nickel cobaltite aerogels from an epoxide-driven sol-gel process. *Advanced materials* 22:347-51
124. Li F, Jiang H, Zhang S. 2007. An ion-imprinted silica-supported organic-inorganic hybrid sorbent prepared by a surface imprinting technique combined with a polysaccharide incorporated sol-gel process for selective separation of cadmium(II) from aqueous solution. *Talanta* 71:1487-93
125. Jia WZ, Wang K, Zhu ZJ, Song HT, Xia XH. 2007. One-step immobilization of glucose oxidase in a silica matrix on a Pt electrode by an electrochemically induced sol-gel process. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 23:11896-900
126. Chen W, Oh S, Ong AP, Oh N, Liu Y, et al. 2007. Antibacterial and osteogenic properties of silver-containing hydroxyapatite coatings produced using a sol gel process. *Journal of biomedical materials research. Part A* 82:899-906
127. Boettcher SW, Fan J, Tsung CK, Shi Q, Stucky GD. 2007. Harnessing the sol-gel process for the assembly of non-silicate mesostructured oxide materials. *Accounts of chemical research* 40:784-92
128. Alvarez GS, Desimone MF, Diaz LE. 2007. Immobilization of bacteria in silica matrices using citric acid in the sol-gel process. *Applied microbiology and biotechnology* 73:1059-64
129. Vidinha P, Augusto V, Almeida M, Fonseca I, Fidalgo A, et al. 2006. Sol-gel encapsulation: an efficient and versatile immobilization technique for cutinase in non-aqueous media. *Journal of biotechnology* 121:23-33
130. Hernandez-Garcia FA, Torres-Delgado G, Castanedo-Perez R, Zelaya-Angel O. 2016. Gaseous benzene degradation by photocatalysis using ZnO + Zn₂TiO₄ thin films obtained by sol-gel process. *Environmental science and pollution research international* 23:13191-9
131. Guo K, Zhang R, Mou Q, Cui R, Deng C. 2016. Ferroelectric, Dielectric, Ferromagnetic, and Magnetoelectric Properties of BNF-NZF Bilayer Nanofilms Prepared via Sol-Gel Process. *Nanoscale research letters* 11:387
132. Xu Y, Chen CJ, Xu R, Mackenzie JD. 1991. Ferroelectric Sr_{0.60}Ba_{0.40}Nb₂O₆ thin films by the sol-gel process: Electrical and optical properties. *Physical review. B, Condensed matter* 44:35-41
133. Huang N, Sun C, Zhu M, Zhang B, Gong J, Jiang X. 2011. Microstructure evolution of zinc oxide films derived from dip-coating sol-gel technique: formation of nanorods through orientation attachment. *Nanotechnology* 22:265612
134. Catauro M, Bollino F, Veronesi P, Lamanna G. 2014. Influence of PCL on mechanical properties and bioactivity of ZrO₂-based hybrid coatings synthesized by sol-gel dip coating technique. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 39:344-51
135. Peng YT, Lo KF, Juang YJ. 2010. Constructing a superhydrophobic surface on polydimethylsiloxane via spin coating and vapor-liquid sol-gel process. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 26:5167-71
136. Song Y, Zheng M, Ma L, Shen W. 2010. Anisotropic growth and formation mechanism investigation of 1D ZnO nanorods in spin-coating sol-gel process. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 10:426-32
137. Wang X, Han M, Bao J, Tu W, Dai Z. 2012. A superoxide anion biosensor based on direct electron transfer of superoxide dismutase on sodium alginate sol-gel film and its application to monitoring of living cells. *Analytica chimica acta* 717:61-6
138. Ren J, Wang L, Han X, Cheng J, Lv H, et al. 2013. Organic silicone sol-gel polymer as a noncovalent carrier of receptor proteins for label-free optical biosensor application. *ACS applied materials & interfaces* 5:386-94
139. Demirkoran N, Ekinici E. 2012. Immobilization of Glucose Oxidase in GLYMO/MTEOS Sol-Gel Film for Glucose Biosensor Application. *Acta chimica Slovenica* 59:302-6

140. Depagne C, Roux C, Coradin T. 2011. How to design cell-based biosensors using the sol-gel process. *Analytical and bioanalytical chemistry* 400:965-76
141. Li F, Chen W, Tang C, Zhang S. 2009. Development of hydrogen peroxide biosensor based on in situ covalent immobilization of horseradish peroxidase by one-pot polysaccharide-incorporated sol-gel process. *Talanta* 77:1304-8
142. Velten D, Eisenbarth E, Schanne N, Breme J. 2004. Biocompatible Nb₂O₅ thin films prepared by means of the sol-gel process. *Journal of materials science. Materials in medicine* 15:457-61
143. Petersen J, Brimont C, Gallart M, Schmerber G, Gilliot P, et al. 2010. Correlation of structural properties with energy transfer of Eu-doped ZnO thin films prepared by sol-gel process and magnetron reactive sputtering. *Journal of applied physics* 107:123522
144. Gomez-Pozos H, Arredondo E JL, Maldonado Alvarez A, Biswal R, Kudriavtsev Y, et al. 2016. Cu-Doped ZnO Thin Films Deposited by a Sol-Gel Process Using Two Copper Precursors: Gas-Sensing Performance in a Propane Atmosphere. *Materials* 9
145. Abbasi V, Sarafray-Yazdi A, Amiri A, Vatani H. 2016. Determination of Aromatic Amines Using Solid-Phase Microextraction Based on an Ionic Liquid-Mediated Sol-Gel Technique. *Journal of chromatographic science* 54:677-81
146. Franco E, Dussan R, Amu M, Navia D. 2018. Statistical Optimization of the Sol-Gel Electrospinning Process Conditions for Preparation of Polyamide 6/66 Nanofiber Bundles. *Nanoscale research letters* 13:230
147. Wang Y, Wang R, Habib E, Wang R, Zhang Q, et al. 2017. Surface modification of quartz fibres for dental composites through a sol-gel process. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 74:21-6
148. Song EH, Jeong SH, Park JU, Kim S, Kim HE, Song J. 2017. Polyurethane-silica hybrid foams from a one-step foaming reaction, coupled with a sol-gel process, for enhanced wound healing. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 79:866-74
149. Ramesh S, Kim JH. 2014. Synthesis of cellulose-L-tyrosine-silica hybrid nanocomposites by sol-gel process for high performance applications. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 14:7558-61
150. Es'haghi Z, Sorayaei H, Samadi F, Masrournia M, Bakherad Z. 2011. Fabrication of a novel nanocomposite based on sol-gel process for hollow fiber-solid phase microextraction of aflatoxins: B1 and B2, in cereals combined with high performane liquid chromatography-diode array detection. *Journal of chromatography. B, Analytical technologies in the biomedical and life sciences* 879:3034-40
151. Li X, Yu M, Hou Z, Wang W, Li G, et al. 2010. Preparation and luminescence properties of Lu(2)O(3):Eu(3+) nanofibers by sol-gel/electrospinning process. *Journal of colloid and interface science* 349:166-72
152. Cheng Y, Zhao Y, Zhang Y, Cao X. 2010. Preparation of SrAl₂O₄:Eu(2+), Dy(3+) fibers by electrospinning combined with sol-gel process. *Journal of colloid and interface science* 344:321-6
153. Allo BA, Rizkalla AS, Mequanint K. 2010. Synthesis and electrospinning of epsilon-polycaprolactone-bioactive glass hybrid biomaterials via a sol-gel process. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 26:18340-8
154. Remillard JT, Jones JR, Poindexter BD, Narula CK, Weber WH. 1999. Demonstration of a high-temperature fiber-optic gas sensor made with a sol-gel process to incorporate a fluorescent indicator. *Applied optics* 38:5306-9
155. Dai Z, Meiser F, Mohwald H. 2005. Nanoengineering of iron oxide and iron oxide/silica hollow spheres by sequential layering combined with a sol-gel process. *Journal of colloid and interface science* 288:298-300
156. Kim SH, Liu BY, Zachariah MR. 2004. Ultrahigh surface area nanoporous silica particles via an aerosol-gel process. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 20:2523-6
157. Chiappone A, Fantino E, Roppolo I, Lorusso M, Manfredi D, et al. 2016. 3D Printed PEG-Based Hybrid Nanocomposites Obtained by Sol-Gel Technique. *ACS applied materials & interfaces* 8:5627-33
158. Costantini A, Luciani G, Silvestri B, Tescione F, Branda F. 2008. Bioactive poly(2-hydroxyethylmethacrylate)/silica gel hybrid nanocomposites prepared by sol-gel process. *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials* 86:98-104

159. Cannas C, Musinu A, Piccaluga G, Fiorani D, Peddis D, et al. 2006. Magnetic properties of cobalt ferrite-silica nanocomposites prepared by a sol-gel autocombustion technique. *The Journal of chemical physics* 125:164714
160. Shchipunov YA, Karpenko TY. 2004. Hybrid polysaccharide-silica nanocomposites prepared by the sol-gel technique. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 20:3882-7
161. Taira M, Toyooka H, Miyawaki H, Yamaki M. 1993. Studies on radiopaque composites containing ZrO₂-SiO₂ fillers prepared by the sol-gel process. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 9:167-71
162. Suzuki H, Taira M, Wakasa K, Yamaki M. 1991. Refractive-index-adjustable fillers for visible-light-cured dental resin composites: preparation of TiO₂-SiO₂ glass powder by the sol-gel process. *Journal of dental research* 70:883-8
163. Riegger BR, Kowalski R, Hilfert L, Tovar GEM, Bach M. 2018. Chitosan nanoparticles via high-pressure homogenization-assisted miniemulsion crosslinking for mixed-matrix membrane adsorbers. *Carbohydrate polymers* 201:172-81
164. Marino T, Russo F, Figoli A. 2018. The Formation of Polyvinylidene Fluoride Membranes with Tailored Properties via Vapour/Non-Solvent Induced Phase Separation. *Membranes* 8
165. Ramanauskaite L, Snitka V. 2015. The synthesis of controlled shape nanoplasmonic silver-silica structures by combining sol-gel technique and direct silver reduction. *Nanoscale research letters* 10:133
166. Xu ZY, Li YH, Wang LJ. 2014. Versatile technique to functionalize optical microfibers via a modified sol-gel dip-coating method. *Optics letters* 39:34-6
167. Al-Khanbashi HA, Shirbeeney W, Al-Ghamdi AA, Bronstein LM, Mahmoud WE. 2014. Spectroscopic ellipsometry of Zn(1-x)Cu(x)O thin films based on a modified sol-gel dip-coating technique. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 118:800-5
168. Sarkar K, Rawolle M, Herzig EM, Wang W, Buffet A, et al. 2013. Custom-made morphologies of ZnO nanostructured films templated by a poly(styrene-block-ethylene oxide) diblock copolymer obtained by a sol-gel technique. *ChemSusChem* 6:1414-24
169. Tao S, Jayaprakash A. 2009. Nanostructured scintillating optical fiber prepared via sol-gel technique for detecting gamma radiation. *Optics letters* 34:3244-6
170. He M, Yuan XC, Ngo N, Bu J, Tao S. 2003. Low-cost and efficient coupling technique using reflowed sol-gel microlens. *Optics express* 11:1621-7
171. He M, Yuan X, Ngo NQ, Cheong WC, Bu J. 2003. Reflow technique for the fabrication of an elliptical microlens array in sol-gel material. *Applied optics* 42:7174-8
172. Ochsenbein A, Chai F, Winter S, Traisnel M, Breme J, Hildebrand HF. 2008. Osteoblast responses to different oxide coatings produced by the sol-gel process on titanium substrates. *Acta biomaterialia* 4:1506-17
173. R Zainul BO, I Dewata, J Efendi. 2018. Thermal and Surface Evaluation on The Process of Forming a Cu₂O/CuO Semiconductor Photocatalyst on a Thin Copper Plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*
174. Kelly DN, Wakabayashi RH, Stacy AM. 2014. A modified sol-gel technique for pore size control in porous aluminum oxide nanowire templates. *ACS applied materials & interfaces* 6:20122-9
175. Adam F, Chua JH. 2004. The adsorption of palmytic acid on rice husk ash chemically modified with Al(III) ion using the sol-gel technique. *Journal of colloid and interface science* 280:55-61
176. Catauro M, Bollino F, Papale F. 2014. Biocompatibility improvement of titanium implants by coating with hybrid materials synthesized by sol-gel technique. *Journal of biomedical materials research. Part A* 102:4473-9
177. Zainul R. 2015. Disain dan Modifikasi Kolektor dan Reflektor Cahaya pada Panel Sel Surya Al/Cu₂O-Gel Na₂SO₄. *Research Report*
178. M Mawardi DD, R Zainul. 2018. Characterization of PCC Cement by Addition of Napa Soil from Subdistrict Sarilamak 50 Kota District as Alternative Additional Material for Semen Padang. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*
179. M., Yani, S. R., & Zainul, R. (2017, September 4). Aktivasi Tanah Napa dan Pengaruhnya Terhadap Adsorpsi Ion Timbal (II)/ Pb²⁺. <https://doi.org/10.31227/osf.io/ps523>

180. Zainul, R., Oktavia, B., Dewata, I., & efendi, j. (2017, February 4). Studi Dinamika Molekular dan Kinetika Reaksi pada Pembelahan Molekul Air untuk Produksi Gas Hidrogen.
<https://doi.org/10.31227/osf.io/876s3>
181. Zainul, R., & Dewata, I. (2015, December 29). Determination of pH-BOD-COD and degradation in batang arau watersheds at Padang city. <https://doi.org/10.31227/osf.io/efdzt>
182. H., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2016, August 30). Synthesis and Electrical Properties of ZnO-ITO and Al-ITO thin Film by Spin Coating Technique Through Sol Gel Process.
<https://doi.org/10.31227/osf.io/unrt4>
183. Zainul, R. (2016, September 24). Determination of the half-life and the quantum yield of ZnO semiconductor photocatalyst in humic acid. <https://doi.org/10.31227/osf.io/e8a9x>
184. Zainul, R. (2016, December 18). Design and Modification of Copper Oxide Electrodes for Improving Conversion Coefficient Indoors Lights (PV-Cell) Photocells. <https://doi.org/10.31227/osf.io/pgn84>
185. Zainul, R., Alif, A., Aziz, H., Arief, S., & s. (2015, October 22). Photoelectrospitting Water Mechanism at Carbon Electrode Surface using Indoor lights. <https://doi.org/10.31227/osf.io/vcxq8>
186. H., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2016, August 30). Synthesis and Electrical Properties of ZnO-ITO and Al-ITO thin Film by Spin Coating Technique Through Sol Gel Process.
<https://doi.org/10.31227/osf.io/unrt4>
187. Anhar, A., Sumarmin, R., & Zainul, R. (2016, August 30). Measurement of Glycemic Index of West Sumatera Local Rice Genotypes for Healthy Food Selection. <https://doi.org/10.31227/osf.io/tgy8h>
188. M., Sanjaya, H., & Zainul, R. (2015, December 30). Characterization of napa soil and adsorption of Pb (II) from aqueous solutions using on column method. <https://doi.org/10.31227/osf.io/t8fh9>
189. chaidir, z., Fadjria, N., A., & Zainul, R. (2016, December 5). ISOLATION AND MOLECULAR IDENTIFICATION OF FRESHWATER MICROALGAE IN MANINJAU LAKE WEST SUMATERA.
<https://doi.org/10.31227/osf.io/nbcuf>
190. chaidir, z., Zainul, R., Nurakhbari, D., & Salim, M. (2016, September 24). Optimization of Spirulina Platensis Culture for Antioxidant Production. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/FD6E4>