



Sintesis Kopoli(Anetol-Stearil Akrilat-Divinilbenzena) sebagai Material Alternatif Adsorben

(Synthesis of Copoly(Anethol-Styryl Acrylate-Divinylbenzene) as an Alternative Adsorbent Material)

Desi Suci Handayani*, Edi Pramono, Bagus Indra Suwaji

Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Sebelas Maret
Jalan Ir. Sutami 36 A, Kentingan, Surakarta, 57126, Indonesia

*Corresponding author: desisuci@staff.uns.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.20.1.77588.82-97

Received 4 August 2023, Revised 6 September 2023, Accepted 6 September 2023, Published 30 March 2024

Kata kunci:

adsorpsi;
anetol;
divinilbenzena;
kopolimerisasi
kationik;
stearil akrilat.

ABSTRAK. Sintesis kopoli(Anetol-Stearil Akrilat-Divinilbenzena) atau KASA-DVB berhasil dilakukan melalui reaksi kopolimerisasi kationik menggunakan inisiator $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ dan Stearil Akrilat (SA) dengan variasi 2, 4, dan 6 (b/b), pada jumlah anetol dan DVB tetap. Produk yang dihasilkan dikarakterisasi gugus fungsi, struktur, morfologi, viskositas intrinsik dan sifat termalnya berturut-turut menggunakan spektroskopi *Fourier-transform infrared* (FT-IR), *proton nuclear magnetic resonance* ($^1\text{H-NMR}$), *scanning electron microscopy* dengan *energy dispersive X-ray* (SEM-EDX), viskometer Ostwald dan analisis *thermogravimetric-differential thermal-differential scanning calorimetry* (TG/DTA-DSC). Uji kinerja adsorpsi senyawa dilakukan dengan metode *batch* dan konsentrasi adsorbat ditentukan dengan Spektrofotometer UV-Vis. Data FT-IR menunjukkan hilangnya serapan gugus alil dan vinil sementara data $^1\text{H-NMR}$ menunjukkan hilangnya H-alil dan H-vinil yang mengindikasikan KASA-DVB berhasil disintesis. Penambahan konsentrasi SA dapat meningkatkan nilai viskositas intrinsik. Analisis morfologi KASA-DVB diperoleh padatan dengan permukaan yang relatif kasar dan jumlah rongga semakin sedikit. Analisis termogram TG/DTA-DSC menunjukkan penurunan sifat termal yaitu diperoleh titik inisiasi degradasi massa yang lebih rendah. Nilai kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh dari hasil uji kinerja adsorpsi pada waktu kontak ke-60 menit dan variasi berat SA 2%. Berdasarkan data kinerja adsorpsi, menunjukkan bahwa KASA-DVB memiliki potensi sebagai adsorben. Uji adsorpsi menunjukkan kapasitas adsorpsi terbesar adalah 23,22 (mg/g) pada KASA-DVB 2%.

Keywords:

adsorption;
anethole;
divinylbenzene;
cationic
copolymerization;
stearyl acrylate.

ABSTRACT. Synthesis of copoly(Anethole-Stearyl Acrylate-Divinylbenzene) or KASA-DVB was successfully carried out by a cationic copolymerization reaction using $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ initiator and various concentrations of Stearyl Acrylate (SA) are 2, 4, and 6 wt. The resulting products were characterized by functional groups, structure, morphology, intrinsic viscosity, and thermal properties using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), proton nuclear magnetic resonance spectroscopy ($^1\text{H-NMR}$), scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX), Ostwald Viscometer, and thermogravimetric-differential thermal-differential scanning calorimetry analysis (TG/DTA-DSC), respectively. The adsorption performance was analyzed using the batch method, and the adsorbate concentration was determined using a UV-Vis spectrophotometer. The FT-IR data showed loss of allyl and vinyl groups absorption, while $^1\text{H-NMR}$ data showed loss of H-allyl and H-vinyl, indicating that KASA-DVB was successfully synthesized. The increase in SA concentration can increase the intrinsic viscosity value. Morphological analysis of KASA-DVB obtained solid materials with a relatively rough surface and fewer cavities. Thermogram analysis of TG/DTA-DSC showed a decrease in thermal properties, which was a lower mass degradation initiation point. The highest adsorption capacity was obtained from the adsorption performance with a contact time of 60 minutes and 2% SA weight variation. The adsorption performance data shows that KASA-DVB is potent as an adsorbent. The adsorption showed that the largest adsorption capacity was 23.22 (mg/g) on KASA-DVB 2%.

PENDAHULUAN

Anetol merupakan salah satu senyawa aromatis yang terkandung dalam tanaman seperti *Syzygium anisatum*, *Foeniculum vulgare*, *Melissa officinalis*, dan *Coriandrum sativum* sebesar 80 – 90% (Chaudhari *et al.*, 2020; Rostiana, 2016). Anetol adalah zat aromatis bifungsional alami yang dapat dimodifikasi lebih lanjut menjadi bahan awal untuk memperoleh senyawa lain seperti *p*-metoksibenzaldehida dan asam *p*-anisat (Xu *et al.*, 2017; Lai and

Cite this as: Handayani, D. S., Pramono, E., & Suwaji, B. I., 2024. Sintesis Kopoli(Anetol-Stearil Akrilat-Divinilbenzena) sebagai Material Alternatif Adsorben. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 20(1), 81–96. <https://dx.doi.org/10.20961/alchemy.20.1.77588.82-97>.

Lee, 2001; Hirashima *et al.*, 2009). Gugus alil dan gugus metoksi memungkinkan anetol membentuk suatu polimer dengan modifikasi tertentu (Wang *et al.*, 2020).

Polimer merupakan makromolekul yang tersusun dari monomer yang merupakan molekul lebih kecil. Polimer terbagi menjadi dua jenis berdasarkan asal pembuatannya yaitu polimer alam dan polimer hasil sintesis manusia (McIntyre, 2015; Handayani *et al.*, 1997). Manfaat polimer sudah dirasakan hampir di seluruh aspek kehidupan manusia. Hal tersebut mendorong para peneliti untuk lebih mengembangkan sintesis polimer modern. Anetol muncul sebagai monomer terbarukan berbasis-bio dalam aplikasi pada bidang kesehatan seperti *Anethole Trithione Phosphate* (ATPX) dan *Sodium Polyanehole Sulfonate* (SPS) yang sangat diandalkan untuk obat kanker, proses transformasi DNA, dan menghitung protein (Huang *et al.*, 2020; Thuy *et al.*, 2018; Prax *et al.*, 2015; Risti and Musi, 2017). Potensi lainnya yaitu sebagai material adsorben *biophenylpropene trans-anethole* (ANE) yang dapat mengadsorpsi polutan (Cr^{2+} , Pb^{2+} , dan zat warna) dari air tercemar (Raza *et al.*, 2018). Teknologi *fluoropolymer* juga berasal dari material terbarukan ini (He *et al.*, 2016). Anetol juga berpotensi membentuk suatu kopolimer (Anetol-DVB) sulfonat sebagai bahan alternatif resin penukar kation (McIntyre, 2015; Handayani *et al.*, 1997). Oleh karena itu, polimer dengan monomer anetol mampu menghasilkan suatu polimer yang memiliki performa tinggi.

Penggolongan polimer berdasarkan jenis monomernya dibedakan menjadi homopolimer (monomer sama) dan kopolimer (monomer berbeda). Kopolimer berdasarkan segi susunannya terbagi menjadi kopolimer acak, cangkok, blok, dan selang-seling. Selain itu, dari segi pembentukannya polimer terbagi dalam kelompok kopolimerisasi radikal, rantai, dan ionik (anionik dan kationik). Hal terpenting yang mendasari terbentuknya suatu polimer adalah tahapan polimerisasi yang dilakukan dengan baik mulai dari inisiasi, propagasi, dan terminasi (McIntyre, 2015). Salah satu polimer yang cukup berkembang pesat yakni polimer kationik. Adanya muatan positif pada sistem polimer kationik yang muncul pada rantai utama dan/atau rantai samping memungkinkan potensi modifikasi lebih lanjut (Samal *et al.*, 2012; Putnam, 2006; McLachlan *et al.*, 2007). Hal tersebut membuat polimer lebih aplikatif di bidang lain terutama sebagai adsorben dan material elektrostatik (Raza *et al.*, 2018; Samal *et al.*, 2012).

Asam akrilat dan turunannya merupakan material yang berpotensi dalam berbagai produk industri seperti plastik, tekstil, pelapis, elastomer, perekat, dan cat (Lêvêque and Saint-Léger, 2002; Mori and Müller, 2003). Kelimpahan asam akrilat di dunia mencapai 10,35 ton pada tahun 2024 serta masih meningkat di tahun berikutnya (Pappoppula, 2020). Akrilat dan turunannya menjadi bahan baku andalan dikarenakan reaksi menggunakan akrilat memiliki kelebihan antara lain metode yang lebih ekonomis, biaya murah dan memiliki toksisitas rendah (Wang *et al.*, 2017). Salah satu turunan asam akrilat adalah Stearil Akrilat (SA), yang sangat terkenal dengan sifat-sifat fisika dan kimiawinya (Sheng *et al.*, 2018). SA memiliki potensi untuk menjadi monomer yang cukup reaktif dalam reaksi kopolimerisasi radikal bergantung pada rantai alkil hidrofobik dan gugus vinilnya. Properti yang dihasilkan dari kopolimer yang mengandung SA seperti *polyurethane-co-SA* dapat meningkatkan resistensi air dengan baik sehingga mengoptimalkan kinerja *waterproofing* dan stabilitas suhu (Sheng *et al.*, 2018; Hirose *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2008; Liang, 2012; Peruzzo *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2017).

Berdasarkan laporan statistik dari *National Waste Report*, limbah organik mencapai 15 juta ton di akhir tahun 2020 dan diperkirakan akan terus bertambah setiap tahunnya. Salah satu jenis senyawa berbahaya yang terkandung dalam limbah organik adalah fenol karena kelarutannya yang cukup tinggi di dalam air (Mandal and Das, 2019). Hal tersebut menjadi problematika serius karena menimbulkan dampak negatif terhadap makhluk hidup (Slamet *et al.*, 2005). Efek jangka panjang paparan fenol terhadap lingkungan juga dapat merusak ekosistem air hewan dan tumbuhan (Nirmala *et al.*, 2019).

Jenis polimer berdasarkan bentuk susunan rantainya dibedakan menjadi polimer linier, cabang dan sambung-silang (*crosslink*). Proses kopolimerisasi antara anetol dan SA akan disambung-silangkan dengan senyawa *Divinylbenzene* (DVB), menjadi suatu tantangan utama dalam penelitian ini untuk menghasilkan kopolimer terbarukan yang aplikatif sebagai adsorben. Reaksi kopolimerisasi kationik mengedepankan keterbaruan bahan baku, reaksi katalisis, sintesis lebih aman, efisiensi energi, dan produk yang lebih aman akan menjadi fokus utama selama proses penelitian nanti. Penelitian ini mempelajari berbagai karakterisasi dan uji untuk menunjang dan membuktikan terbentuknya kopolimerisasi terbarukan performa tinggi. Munculnya kopolimer terbarukan akan membantu peneliti selanjutnya yang berfokus pada kemampuan adsorpsi tinggi pada material adsorben.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan mempunyai spesifikasi E Merek kecuali yang disebutkan khusus. Bahan yang digunakan yaitu *Trans*-Anetol, Stearil akrilat (SA) 97%(Aldrich), Divinilbenzena (DVB), $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$, kloroform, Na_2SO_4 anhidrat, NaCl jenuh, metanol (CH_3OH), dan NaOH.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat alat gelas, Spektrofotometer *Fourier Transform InfraRed* (FT-IR) *Shimadzu Type FT-IR-8201 PC KBr*, Spektroskopi $^1\text{Hydrogen-Nuclear Magnetic Resonance}$ ($^1\text{H-NMR}$ *Agilent 500 MHz*), *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (JED-23000), *Thermogravimetric/Differential Thermal-Differential Scanning Calorimetry Analysis* (TG/DTA-DSC) (*Linseis Type PT 1600*), Spektrofotometer UV-Visible *Hitachi UH-3500*, dan viskometer Ostwald *Iwaki Pyrex*.

Pemurnian Stearil Akrilat (SA)

Monomer SA dicuci dengan larutan NaOH 5% hingga tidak ada inhibitor monometil eter hidrokuinon yang tersisa, lalu dibilas dengan akuades hingga pH netral. Analisis kualitatif inhibitor monometil eter hidrokuinon dalam akuades dilakukan dengan penambahan FeCl_3 yang ditandai dengan tidak adanya endapan kuning.

Sintesis Kopolimer(Anetol-SA-DVB) atau KASA-DVB

Anetol sebanyak 5 gram dimasukkan ke dalam labu leher tiga 100 mL, kemudian ditambahkan SA dengan variasi sebanyak 2, 4, dan 6 (b/b) dari berat anetol serta ditambahkan DVB sebanyak 2% (b/b) dari berat anetol. Kopolimerisasi dilakukan dengan dialiri gas N_2 (1 atm) di suhu ruang ($28 - 31^\circ\text{C}$), lalu diaduk selama 15 menit hingga homogen. Kopolimerisasi berlangsung selama empat jam dengan setiap satu jamnya ditambahkan inisiator $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ sebanyak 0,25 mL. Terminasi kopolimerisasi dilakukan dengan menambahkan 0,1 mL metanol. Hasil kopolimerisasi dilarutkan menggunakan kloroform dan dicuci melalui ekstraksi cair-cair dengan akuades hingga pH netral. Fase organik dikeringkan dengan Na_2SO_4 anhidrat kemudian pelarut diuapkan. Analisis struktur dilakukan menggunakan spektroskopi FT-IR dan $^1\text{H-NMR}$. Adapun karakterisasi dilakukan pada viskositas intrinsik menggunakan viskometer Ostwald, karakteristik morfologi menggunakan SEM-EDX dan sifat termal menggunakan TG/DTA-DSC.

Penentuan Viskositas Intrinsik KASA-DVB

Penentuan viskositas intrinsik dari KASA-DVB dilakukan dengan membuat larutan dari KASA-DVB menggunakan pelarut kloroform. Pengukuran ini dilakukan dengan cara menentukan waktu alir dari larutan KASA-DVB menggunakan viskometer Ostwald pada variasi konsentrasi 0,02000; 0,01000; 0,00500; 0,00250; dan 0,00125 g/mL serta dari pelarut murni kloroform. Pengukuran tersebut dilakukan pada suhu ruang ($28 - 31^\circ\text{C}$). Hasil penentuan waktu alir digunakan untuk menghitung viskositas relatif (η_{rel}) berdasarkan [Persamaan \(1\)](#) dan viskositas spesifik (η_{spe}) berdasarkan [Persamaan \(2\)](#). Nilai viskositas intrinsik (η_{int}) diperoleh dari hasil viskositas spesifik (η_{spe}) menggunakan grafik hubungan antara (η_{spe})/C dengan C. Nilai viskositas intrinsik (η_{int}) diperoleh dan dibandingkan.

$$\text{Viskositas relatif } (\eta_{rel}) = \frac{\eta}{\eta^o} = \frac{t}{t^o} \quad (1)$$

$$\text{Viskositas spesifik } (\eta_{spe}) = \frac{\eta - \eta^o}{\eta^o} = \frac{t - t^o}{t^o} = \eta_{rel} - 1 \quad (2)$$

Keterangan :

η = viskositas (Ns/m^2)

η^o = viskositas pelarut murni (Ns/m^2)

t = waktu alir cairan (s)

t_0 = waktu alir pelarut murni(s)

Penentuan Hasil Kinerja Adsorpsi Senyawa fenol dari KASA-DVB

Larutan fenol awal 50 ppm sebanyak 50 mL ditambahkan ke padatan KASA-DVB sebanyak 0,1 gram kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 400 rpm pada suhu ruang selama empat jam. Proses penyaringan dilakukan menggunakan kertas saring Whatman (40 Mess) dan corong kaca sehingga diperoleh filtrat berupa larutan fenol yang sudah teradsorpsi dan sisa adsorben KASA-DVB. Proses tersebut

dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali kemudian diuji absorbansi menggunakan spektrofotometer UV-Vis ($\lambda = 269,5 \text{ nm}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Kopolimer(Anetol-Stearil Akrilat-Divinilbenzena)/KASA-DVB

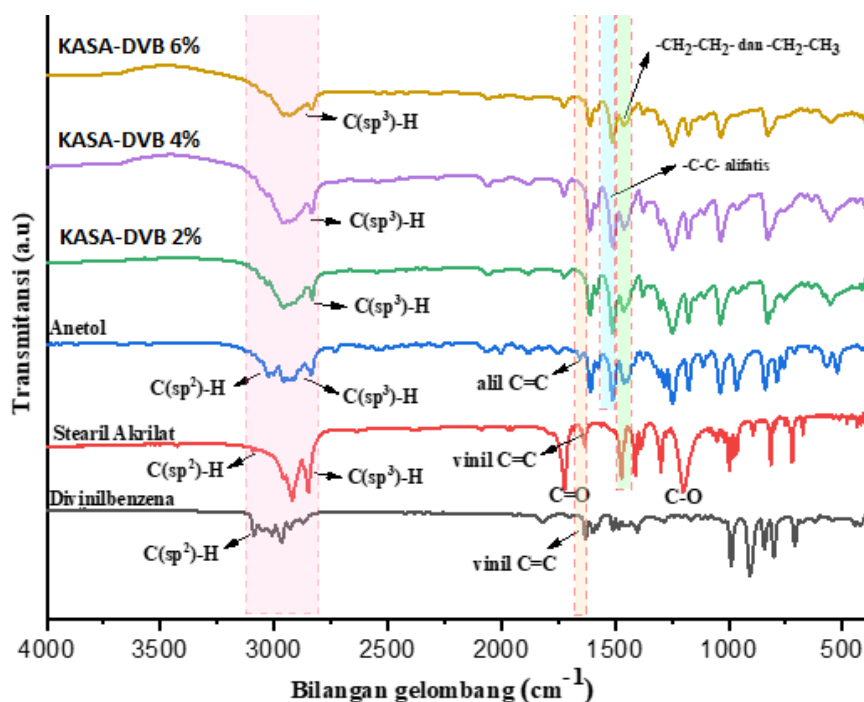
Sintesis KASA-DVB merupakan reaksi kopolimerisasi kationik yang diawali dengan proses inisiasi menggunakan inisiator $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. Inisiator ini merupakan asam-basa Lewis kuat dikarenakan gugus $-\text{BF}_3$ yang memiliki elektronegativitas tinggi dapat mengganggu gugus vinil dan propenil menjadi karbokation yang diperlukan. Selain itu, inisiator ini juga relatif stabil terhadap keberadaan nukleofil dikarenakan kehadiran gugus eterat ($-\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$) dapat menstabilkan muatan $-\text{BF}_3$ kembali pasca inisiasi. Penambahan inisiator dilakukan secara bertahap setiap jam sebanyak empat kali dikarenakan proses regenerasi inisiator diperlukan secara berulang-ulang untuk menginisiasi secara keseluruhan dari anetol, SA, dan DVB.

Sintesis KASA-DVB dilakukan dengan variasi berat SA sebanyak 2, 4, dan 6 (b/b) serta DVB sebanyak 2% (b/b) dari berat anetol. Kehadiran komonomer dengan jumlah yang relatif sedikit cenderung akan membentuk suatu kopolimer blok atau acak dimana semakin meningkat jumlah SA akan menunjukkan berbagai pengaruh pada karakteristiknya ketika dibandingkan dengan homopolimer dari poli-(Anetol). Hasil sintesis KASA-DVB dapat dilihat pada [Tabel 1](#), yang menunjukkan penambahan berat SA dapat meningkatkan nilai rendemen. Hal ini disebabkan karena semakin banyak jumlah SA, semakin meningkat pula kepadatan kopolimer blok. Kepadatan atau densitas dipengaruhi oleh penurunan fleksibilitas rantai pada struktur kopolimer ini, sehingga secara keseluruhan struktur kopolimer semakin *rigid* dan berat kopolimer semakin bertambah.

Tabel 1. Data hasil sintesis KASA-DVB.

Kopolimer	Ciri fisik	Rendemen (%)
KASA-DVB-2%	Padatan putih mengkilap	82%
KASA-DVB-4%	Padatan putih mengkilap	84%
KASA-DVB-6%	Padatan putih mengkilap	90%

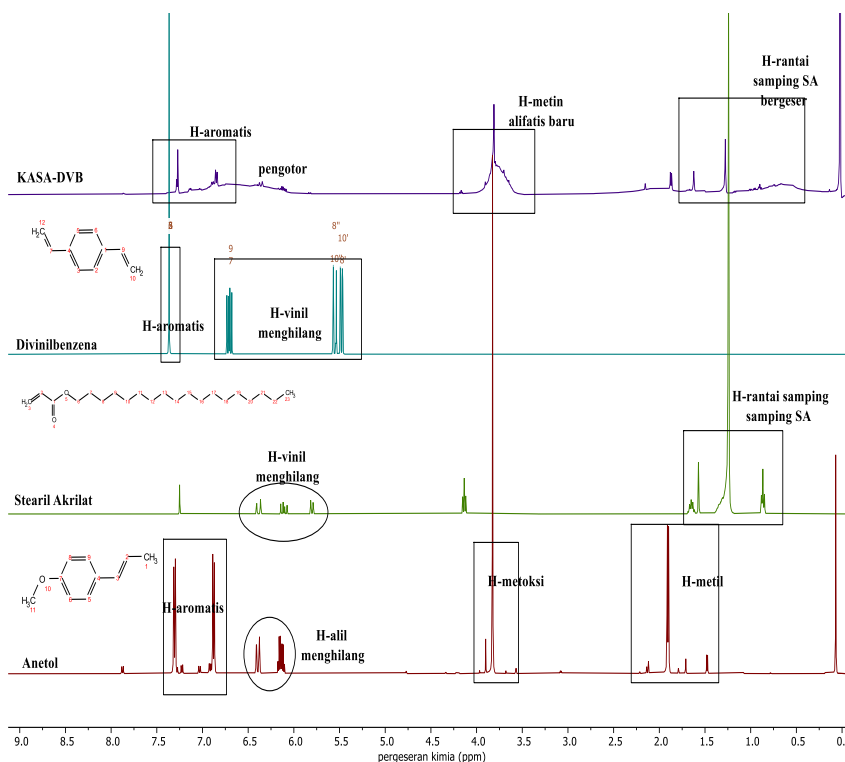
Hasil spektra FT-IR dapat mengidentifikasi karakteristik gugus-gugus fungsi dari anetol, Stearil Akrilat (SA), Divinilbenzena (DVB) dan KASA-DVB. Keberhasilan sintesis KASA-DVB dapat dianalisis dari perbandingan spektra pada KASA-DVB dengan senyawa awalnya. Hasil perbandingan dapat dilihat pada [Gambar 1](#), kemurnian senyawa awal sangat menentukan keberhasilan dari terbentuknya KASA-DVB.



Gambar 1. Perbandingan spektra *Infra-Red* (IR) dari anetol, SA, DVB, dan KASA-DVB.

Hasil analisis menunjukkan hilangnya serapan propenil ($-C=C-$) *stretching* dan *bending* pada $1665 - 1645\text{ cm}^{-1}$ dan $980 - 930\text{ cm}^{-1}$ dari anetol dan serapan SA dan DVB untuk gugus vinil ($H_2C=C-$) *stretching* dan *bending* pada $1655 - 1615\text{ cm}^{-1}$ dan $995 - 960\text{ cm}^{-1}$. Selain itu, serapan $C(sp^3)-H$ *stretching* dan *bending* pada $2970 - 2815\text{ cm}^{-1}$ dan $850 - 750\text{ cm}^{-1}$ dari anetol dan SA berubah menjadi vibrasi melebar (*board vibration*). Keberhasilan sintesis juga ditunjukkan hilangnya serapan $C(sp^2)-H$ *stretching* dan *bending* pada $3050 - 2990\text{ cm}^{-1}$ dan $720 - 700\text{ cm}^{-1}$ dari anetol dan serapan $C(sp^2)-H$ *stretching* dan *bending* pada $3100 - 3000\text{ cm}^{-1}$ dan $720 - 700\text{ cm}^{-1}$ dari SA dan DVB. Berdasarkan hasil tersebut, hilang dan putusnya ikatan ($-C=C-$) pada gugus propenil dan vinil yang didasari oleh reaksi adisi akan membentuk suatu karbokation sehingga reaktivitasnya meningkat, selanjutnya proses propagasi dengan monomer yang lainnya akan berlangsung secara terus menerus membentuk suatu KASA-DVB sampai terjadi proses terminasi.

Identifikasi KASA-DVB dapat dilihat pada [Gambar 1](#), dimana muncul serapan spesifik dari $C(sp^3)-H$ *stretching* dan *bending* pada $2980 - 2815$ dan $840 - 740\text{ cm}^{-1}$. Hal tersebut mengindikasikan bahwa secara keseluruhan senyawa awal sudah terkonversi menjadi KASA-DVB. Serapan *stretching* dan *bending* yang muncul dari gugus $-CH_2-CH_2-$ dan CH_2-CH_3 mengalami pergeseran bilangan gelombang sebesar $10 - 15\text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan bahwa rantai samping SA sudah terkopolimerisasi. Adapun serapan cincin aromatis *stretching* dan *bending* muncul pada $1625 - 1560\text{ cm}^{-1}$, $1525 - 1480\text{ cm}^{-1}$ dan $840 - 800\text{ cm}^{-1}$ serta serapan C-H aromatis *bending* pada $1190 - 1100\text{ cm}^{-1}$. Bentuk serapan-serapan tersebut sama halnya dengan serapan cincin aromatis pada anetol dimana dapat diartikan bahwa KASA-DVB tersusun dari mayoritas senyawa anetol daripada DVB. Munculnya serapan C-O-CH₃ simetris dan asimetris *stretching* pada $1260 - 1235$ dan $1045 - 1030$ dimana bentuk serapan sama halnya dengan gugus metoksi pada anetol. Maka dapat diartikan bahwa terdapat gugus metoksi (OCH₃) yang tersusun pada KASA-DVB. Hal tersebut juga mengindikasikan bahwa proses terminasi oleh metanol (CH₃OH) berhasil dilakukan. Serapan gugus ester C=O dan C-O *stretching* juga muncul pada $1730 - 1720\text{ cm}^{-1}$ dan $1255 - 1175\text{ cm}^{-1}$ sebagai rantai SA. Serapan rantai alifatis ($-C-C-$) spesifik muncul sebagai bentuk serapan baru pada $1520 - 1500\text{ cm}^{-1}$ sekaligus mengindikasikan keberhasilan proses propagasi dari anetol-anetol, anetol-SA dan anetol-DVB. Pengaruh variasi berat SA 2, 4, dan 6 (b/b) tidak dapat ditemukan dari perbandingan spektra KASA-DVB (2, 4, dan 6 b/b). Keberhasilan sintesis KASA-DVB juga didukung dari hasil analisis menggunakan H-NMR dengan membandingkan spektrum ¹H-NMR dari senyawa anetol, SA, DVB, dan KASA-DVB dapat dilihat pada [Gambar 2](#).

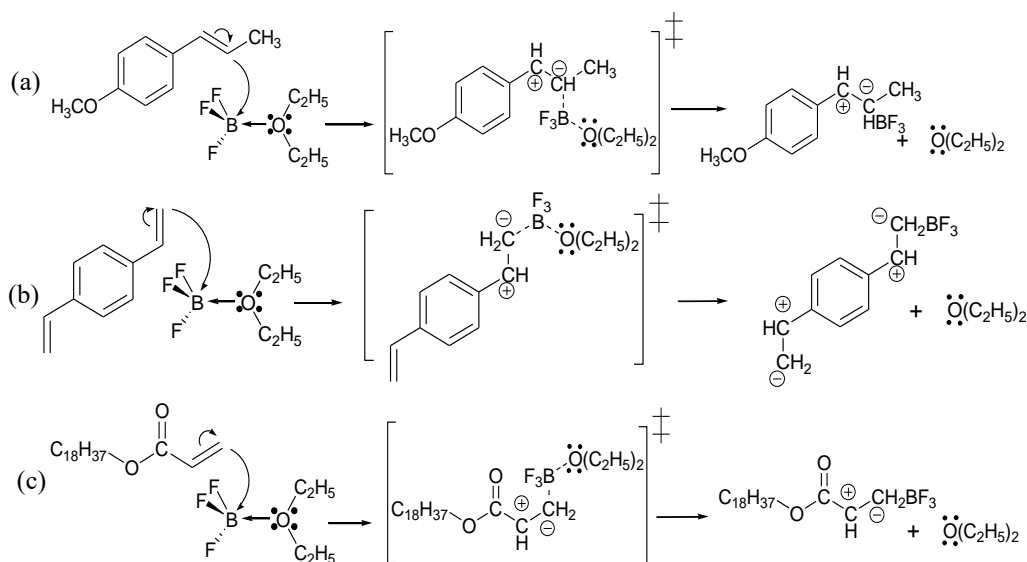


Gambar 2. Perbandingan spektrum ¹H-NMR 500 MHz, CDCl₃) dari anetol, SA, DVB dan KASA-DVB 4%.

Keberhasilan ditunjukkan dengan (1) hilangnya sinyal proton khas dari gugus propenil yang dimiliki oleh senyawa anetol pada $\delta_H = 6,39$ (m, 1H) yang merupakan gugus metin (C_3) dan $\delta_H = 6,14$ (dq, 1H) yang merupakan gugus metin (C_2); (2) gugus vinil yang dimiliki oleh senyawa SA pada $\delta_H = 6,11$ (m, 1H), yaitu gugus metin (C_2), dan $\delta_H = 5,80$ (dd, 2H), yaitu gugus metilen (C_3); (3) gugus divinil posisi *para*- yang dimiliki oleh senyawa DVB pada $\delta_H = 6,71$ (dd, 2H), yaitu gugus metin (C_7 dan C_9), dan $\delta_H = 5,55 - 5,48$ (ddd, 4H), yaitu gugus metilen (C_8 dan C_{10}). Meskipun pada spektrum KASA-DVB menunjukkan sinyal proton lemah pada $\delta_H = 6,75 - 5,40$ ppm, hal tersebut tidak mengindikasikan suatu ikatan intramolekul spesifik atau pengotor (terdeteksi dari analisis kuantitatif menggunakan aplikasi MestReNova). Hal ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa ikatan karbon rangkap dua ($-C=C-$) telah teradisi menjadi ikatan karbon tunggal ($-C-C-$). Menariknya, ikatan karbon tunggal tersebut muncul sebagai sinyal proton baru gugus metin ($-CH-$) alifatis pada $\delta_H = 3,90 - 3,65$ ppm yang mengalami tumpang-tindih dengan sinyal proton khas gugus metoksi dari anetol pada $\delta_H = 3,81$ ppm. Hal tersebut menunjukkan keberhasilan proses inisiasi-propagasi-terminasi dalam kopolimerisasi kationik melalui reaksi adisi.

Selain itu, adapula indikasi pergeseran sinyal proton khas rantai hidrofobik dari SA terhadap KASA-DVB sebesar $\sim 0,07$ ppm (4,14; 1,61; 1,31; 1,24; 0,87 \rightarrow 4,18; 1,68; 1,51; 1,28; 0,91). Hal ini menunjukkan bahwa tingkat *shielding* dari proton-protonnya menurun dikarenakan pengaruh *shielding effect* dari rantai utama KASA-DVB (induksi elektron) yang semakin besar. Sinyal proton khas cincin aromatis dari DVB terindikasi mengalami pergeseran sebesar $\sim 0,09$ ppm dan tumpang-tindih dengan sinyal proton khas cincin aromatis dari anetol sehingga menyebabkan perubahan bentuk spektrum dan multiplisitasnya (m, $(2x+4y)H$). Pergeseran nilai δ_H tersebut menunjukkan tingkat *shielding* dari proton-protonnya meningkat karena molekul-molekul anetol tersambung-silang oleh DVB.

Reaksi kopolimerisasi secara kationik yang didasari oleh reaksi adisi diawali oleh proses inisiasi pada **Gambar 3**. Inisiator yang digunakan adalah inisiator asam-basa Lewis yang cukup kuat yaitu $BF_3O(C_2H_5)_2$. Proses inisiasi terjadi ketika ion $[BF_3]^+$ mulai mendesak ikatan rangkap dua dari setiap molekul anetol, SA, dan DVB. Ikatan tersebut mengalami adisi membentuk ikatan tunggal yang disertai konjugasi elektron sehingga memproduksi suatu karbokation. Hal tersebut dikarenakan atom F pada ion $[BF_3]^+$ memiliki perbedaan keelektronegatifan yang tinggi sehingga elektron pada orbital π mengalami konjugasi. Hasil konjugasi adalah suatu karbanion dan karbokation reaktif.

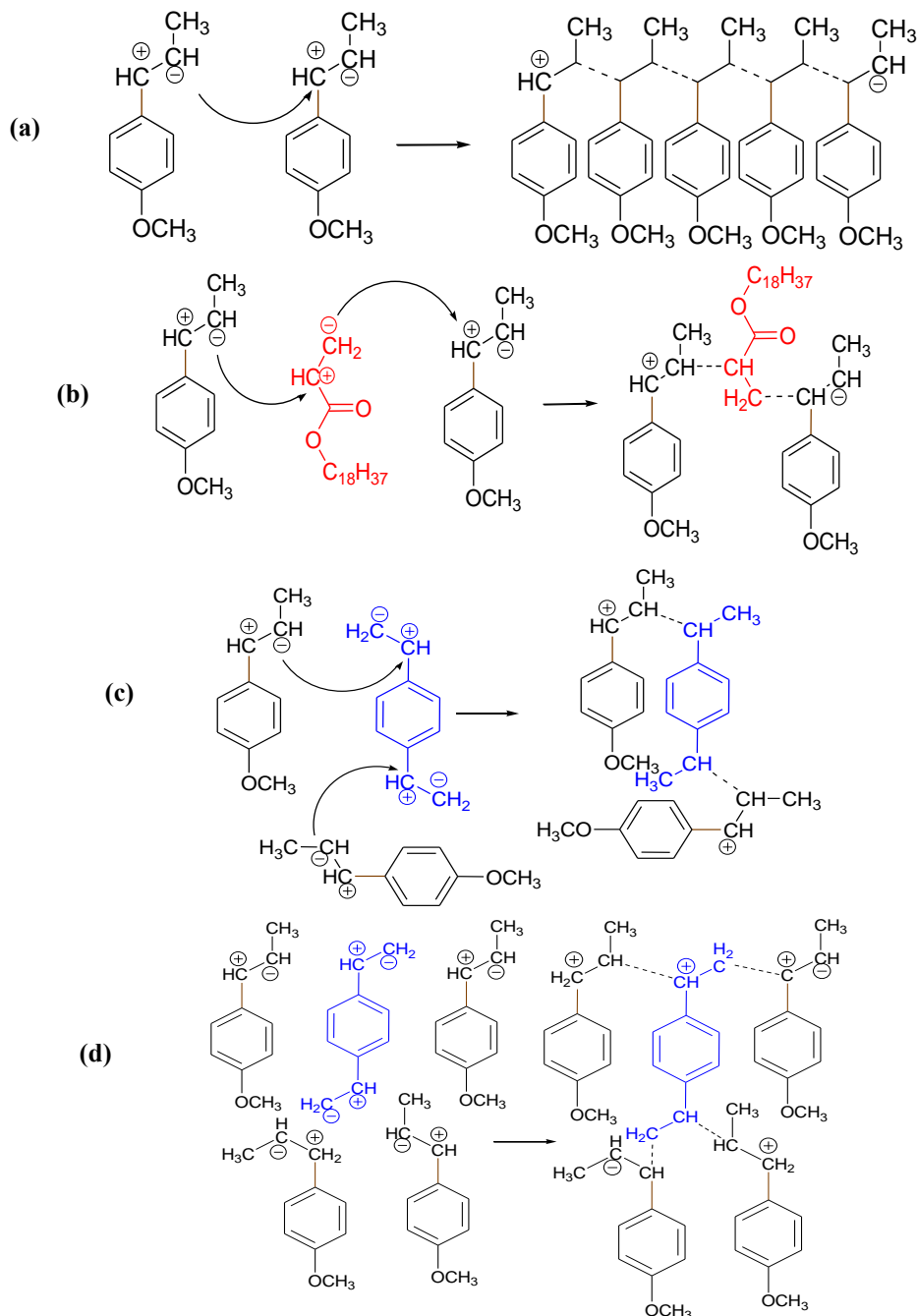


Gambar 3. Prediksi reaksi adisi kationik pada proses inisiasi monomer (a) anetol, (b) DVB, dan (c) SA oleh $BF_3O(C_2H_5)_2$.

Setiap molekul anetol dan SA memproduksi satu karbokation sedangkan pada DVB memproduksi dua karbokation. Molekul DVB terinisiasi terlebih dahulu karena memiliki dua gugus vinil (reaktivitas tinggi), kemudian anetol akan terinisiasi sebagai senyawa mayor dan memiliki gugus propenil. Molekul SA mengalami inisiasi terakhir dikarenakan pengaruh dari rantai samping hidrofobik (reaktivitas rendah) sekaligus sebagai senyawa minor. Proses inisiasi dinyatakan selesai jika seluruh senyawa awal terkonversi menjadi molekul bermuatan positif (terbentuk karbokation). Hal tersebut terindikasi dari perubahan warna menjadi kuning pekat

pada sistem yang semula berwarna kuning bening. Ion $[\text{BF}_3]^+$ yang dilepaskan kembali akan dinetralkan oleh ion eteratnya $[\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2]$.

Karbokation yang dihasilkan merupakan karbokation sekunder ($-\text{C}^+\text{H}-$) dimana karbokation ini tergolong memiliki stabilitas yang relatif lebih tinggi daripada karbokation primer. Oleh karena itu, hal tersebut menjadi faktor utama dalam meningkatkan laju proses propagasi. Proses propagasi merupakan proses elongasi rantai dari KASA-DVB. Prediksi reaksi saat proses propagasi dapat dilihat pada **Gambar 4**, dimana setiap senyawa awal yang terinisiasi membentuk karbokation sekunder yang relatif stabil sehingga dapat berlangsung proses propagasi yang optimal dengan laju propagasi yang relatif tinggi.



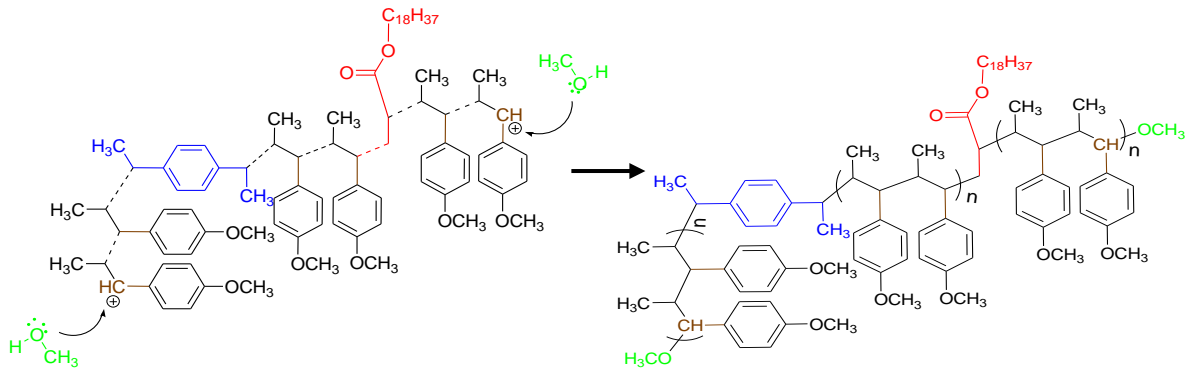
Gambar 4. Prediksi reaksi elongasi rantai pada proses propagasi oleh karbokation yang terbentuk. (a) anetol-anetol-anetol, (b) anetol-SA-anetol, (c) anetol-DVB-anetol (rantai lurus), (d) anetol-DVB-anetol (rantai sambung-silang).

Proses propagasi terjadi saat satu karbokation yang terbentuk diserang oleh karbanion dari monomer lain sehingga membentuk karbokation baru. Hal tersebut terjadi terus menerus sampai proses terminasi diberlakukan.

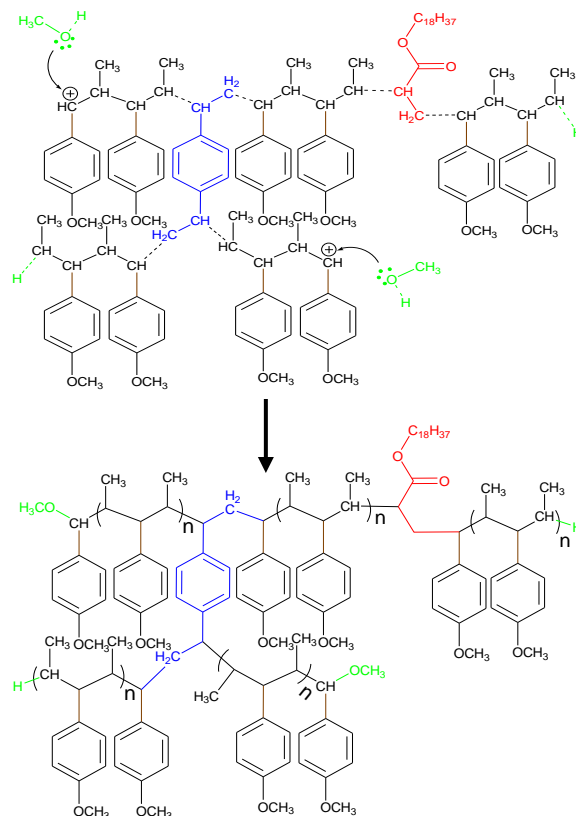
Elongasi rantai pada proses tersebut terbagi menjadi tiga jenis yaitu anetol-anetol-anetol, anetol-SA-anetol dan anetol-DVB-anetol. Indikator terjadinya proses propagasi terjadi saat sistem berubah warna coklat tua yang semula kuning pekat.

Elongasi rantai akan berhenti saat proses terminasi. Proses terminasi dilakukan saat penambahan metanol (CH_3OH) sehingga menyebabkan perubahan warna pada sistem dari yang semula coklat tua menjadi coklat tua kemerahan. Hal tersebut mengindikasikan keberhasilan terbentuknya KASA-DVB. Prediksi reaksi saat proses terminasi dapat dilihat pada **Gambar 4** dimana molekul metanol memiliki pasangan elektron bebas (PEB) pada atom oksigen (O), sehingga membuatnya menjadi suatu nukleofil yang dapat menyerang elektrofil sekaligus menstabilkan karbokation yang masih tersisa saat proses propagasi. Karbokation yang sudah terstabilkan adalah karbokation inaktif. Oleh karena itu, proses tersebut dinamakan terminasi.

Terdapat dua kemungkinan struktur KASA-DVB yang terbentuk dikarenakan kecenderungan suatu DVB sebagai agen penyambung-silang dan pembentuk rantai lurus (linier). Struktur rantai lurus dapat dilihat pada **Gambar 5**, sedangkan struktur sambung-silang dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Prediksi reaksi terminasi oleh metanol pada KASA-DVB rantai lurus.

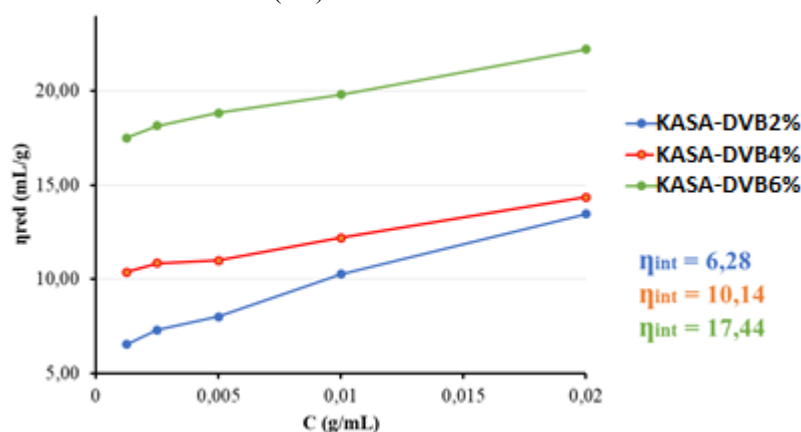


Gambar 6. Prediksi reaksi terminasi oleh metanol pada KASA-DVB rantai sambung-silang.

Pengaruh Variasi Berat SA Terhadap Karakteristik KASA-DVB

Penentuan nilai viskositas intrinsik (η_{int}) dilakukan dengan mengukur viskositas larutan KASA-DVB dalam pelarut kloroform menggunakan alat viskometer Ostwald. Waktu alir pelarut murni (kloroform) dan setiap variasi berat SA diukur pada suhu ruang (28 – 31 °C). Variasi konsentrasi larutan KASA-DVB 2, 4, dan 6 (b/b) dibuat untuk pengukuran viskometer Ostwald yakni 0,00125; 0,0025; 0,005; 0,01; dan 0,02 (g/mL). Pemilihan variasi tersebut didasari oleh selisih terendah terhadap konsentrasi pelarut murninya dan penentuan nilai viskositas minimum dari KASA-DVB. Hasil perhitungan viskositas relatif (η_{rel}), viskositas spesifik (η_{spe}) dan viskositas tereduksi (η_{red}) dapat diperoleh dari pendekatan matematis data waktu alir kloroform dan variasi konsentrasi larutan.

Hasil plot grafik dari (η_{spe}/C) atau (η_{red}) terhadap konsentrasi larutan (C) dapat memperoleh nilai η_{int} yang terinterpretasi dari *intercept* pada persamaan liniernya. Persamaan linier yang diperoleh dari setiap variasi berat SA memiliki nilai R^2 sebesar 0,9938 (SA-2%); 0,9934 (SA-4%) dan 0,9923 (SA-6%). Adapun nilai *intercept* atau (η_{int}) dari setiap variasi berat SA yaitu 6,28 (SA-2%); 10,14 (SA-4%) dan 17,44 (SA-6%). Perbandingan grafik η_{int} dari variasi berat SA dapat dilihat pada (Gambar 7) dimana nilai η_{int} akan semakin meningkat seiring dengan penambahan berat SA. Nilai η_{int} dapat digunakan lebih lanjut untuk menghitung berat molekul rata-rata (M_v) dan derajat polimerisasi (DP_n) dari KASA-DVB dengan bantuan nilai konstanta KASA-DVB dalam pelarut kloroform (K). Berdasarkan peningkatan nilai η_{int} yang ditunjukkan pada (Gambar 7), ditunjukkan bahwa KASA-DVB-6% memiliki ikatan dengan SA terbanyak sehingga memiliki sifat hidrofobik yang paling tinggi. Selain itu, keberhasilan sintesis KASA-DVB juga dapat dibuktikan dari peningkatan nilai viskositas intrinsiknya (η_{int}), yakni sebesar 1,67x dari variasi 2% ke 4% ke 6% (b/b).

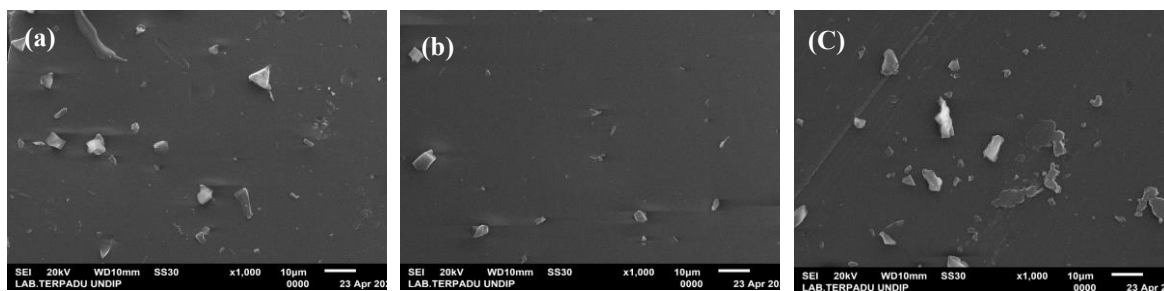


Gambar 7. Grafik perbandingan viskositas intrinsik (η_{int}) yang dipengaruhi variasi berat SA.

Analisis Morfologi KASA-DVB menggunakan SEM-EDX

Morfologi KASA-DVB 2, 4 dan 6% dianalisis menggunakan SEM-EDX dengan perbesaran 1000 kali, sehingga menghasilkan morfologi permukaan KASA-DVB yang dapat dilihat pada (Gambar 8). Penambahan berat SA menginterpretasikan morfologi yang kasar dan bentuk yang relatif tidak beraturan seperti pada poli(Anetol) (PA) dimana partikel PA berukuran rata-rata 56 μm (Appiah-Ntiamoaha *et al.*, 2018), sedangkan pada KASA-DVB memiliki ukuran partikel rata-rata lebih kecil yaitu sekitar 1 – 10 μm .

Hasil analisis morfologi lainnya pada KASA-DVB yaitu memiliki beberapa lekukan dan rongga yang kecil, berukuran sekitar 2 – 3 μm . Pengaruh variasi SA yang semakin besar tidak terlalu signifikan, tetapi terlihat lekukan yang semakin menyempit dan rongga semakin mengecil bahkan tidak terlihat. Adapun pengaruh variasi SA dapat menurunkan ukuran partikel rata-rata. Bentuk kasar dan tidak beraturan menjadi indikator keberhasilan sintesis KASA-DVB. Di sisi lain, lekukan dan rongga yang terlihat merupakan pengaruh dari rantai samping hidrofobik dari SA, dimana semakin banyak molekul SA maka semakin sempit lekukan dan kecil rongga yang terlihat. Berdasarkan morfologi tersebut, KASA-DVB berpotensi menjadi material alternatif adsorben pada limbah terkhusus senyawa fenol.



Gambar 8. Hasil analisis morfologi permukaan menggunakan SEM pada (a) KASA-DVB-2%, (b) KASA-DVB-4%, dan (c) KASA-DVB-6%.

Hasil analisis SEM-EDX juga diperoleh persentase kandungan unsur dalam suatu material dalam satuan persentase massa dan persentase atom seperti yang ditunjukkan pada [Tabel 2](#). Unsur yang terkandung dalam KASA-DVB adalah monomer penyusunnya yaitu anetol, SA dan DVB. anetol dan SA tersusun dari unsur karbon (C), oksigen (O) dan hidrogen (H), sedangkan DVB tersusun dari unsur karbon (C) dan hidrogen (H). Menariknya, pada KASA-DVB terindikasi pengaruh penambahan SA yang dapat menyebabkan penurunan persentase massa unsur C dan menurunnya persentase massa unsur O. Hal tersebut disebabkan karena semakin banyak penambahan berat SA (variasi) maka jumlah unsur O dalam KASA-DVB akan meningkat pula.

Hasil analisis menunjukkan bahwa KASA-DVB-2% memiliki persentase massa C sebesar 87,80% dan massa O sebesar 11,79% serta persentase atom C sebesar 90,71% dan atom O sebesar 9,14%. Senyawa KASA-DVB-4% memiliki persentase massa C sebesar 87,84% dan massa O sebesar 11,96% serta persentase atom C sebesar 90,64% dan atom O sebesar 9,29%. Senyawa KASA-DVB-6% memiliki persentase massa C sebesar 87,60% dan massa O sebesar 12,05% serta persentase atom C sebesar 90,56% dan persentase atom O sebesar 9,35%. Penurunan persentase unsur C dan kenaikan persentase atom O terindikasi sangat kecil dikarenakan jumlah variasi berat SA yang digunakan juga sangat minor mencapai 3:100 molekul secara stoikiometri. Berdasarkan hasil persentase dari analisis EDX maka dapat mengindikasikan keberhasilan sintesis KASA-DVB yang minor dari *impurities* (pengotor). Sifat hidrofobik yang semakin meningkat seiring dengan penambahan SA juga memunculkan potensi KASA-DVB menjadi material alternatif adsorben limbah organik terkhusus senyawa fenol.

Tabel 2. Perbandingan persentase unsur C dan O dalam KASA-DVB pada analisis EDX.

Unsur	SA 2%, b/b		SA 4%, b/b		SA 6%, b/b	
	%Massa	%Atom	%Massa	%Atom	%Massa	%Atom
Karbon (C)	87,80	90,71	87,74	90,64	87,60	90,56
Oksigen (O)	11,79	9,14	11,96	9,29	12,05	9,35
Klorida (Cl)	0,41	0,14	0,08	0,03	0,13	0,05
Tembaga (Cu)	-	-	0,22	0,04	0,22	0,04
Total	100	100	100	100	100	100

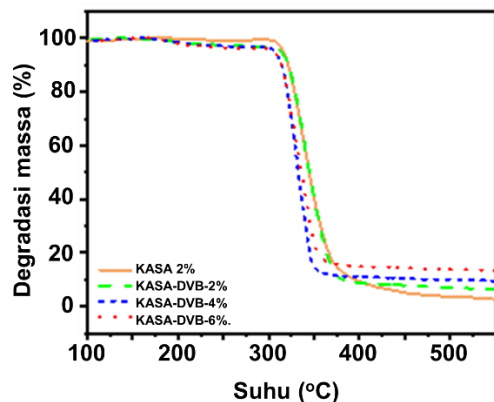
Analisis Sifat Termal KASA-DVB menggunakan TG/DTA-DSC

Sifat termal dari KASA-DVB dapat ditentukan berdasarkan kurva termogram TG/DTA dan DSC. Pengujian termal tersebut menggunakan laju pemanasan sebesar 10 °C/menit dengan rentang suhu dari 28-700 °C. Pengaruh sifat termal oleh penambahan berat SA pada KASA-DVB 2, 4, dan 6 juga dapat diketahui. Pada termogram TG dapat diperoleh jumlah degradasi, identifikasi suhu degradasi dan persentase degradasi massa. Adapun pada turunan pertama termogram TG yakni termogram DTA dapat diperoleh titik mulai degradasi atau onset (T_{onset}), titik puncak maksimal (T_{max}) dan titik final degradasi atau *offset* (T_{offset}) serta adanya termogram DTA dapat mendukung ketepatan jumlah degradasi pada termogram TG. Begitupun pada termogram DSC dapat diperoleh nilai suhu endotermik (T_{endo}). Maka dari itu, penelitian kali ini dapat ditentukan pengaruh penambahan berat SA terhadap beberapa data yang diperoleh.

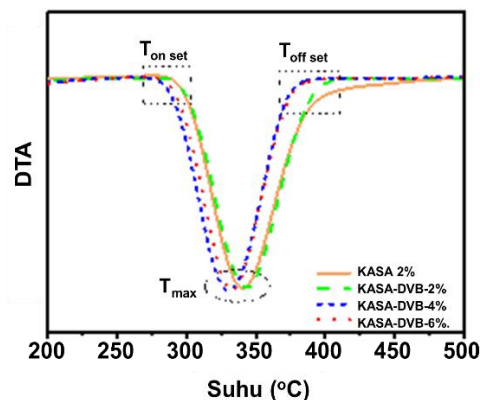
Hasil analisis TG/DTA dari KASA-DVB-2% dapat dilihat pada ([Gambar 9](#)) dan ([Gambar 10](#)) dengan jumlah degradasinya adalah satu sehingga hal tersebut mengindikasikan bahwa kopolimer bersifat homogen. Persentase degradasi massa diperoleh sebesar 87% dengan T_{onset} pada 289 °C, T_{max} pada 343 °C dan T_{offset} pada 398 °C. Adapun hasil analisis dari KASA-DVB-4% memiliki jumlah degradasi satu sehingga mengindikasikan bahwa kopolimer bersifat homogen. Persentase degradasi massa diperoleh sebesar 84% dengan T_{onset} pada 282 °C, T_{max} pada 331 °C dan T_{offset} pada 381 °C. Begitu pula pada hasil analisis dari KASA-DVB-6% memiliki jumlah degradasi satu

sehingga mengindikasikan bahwa kopolimer bersifat homogen. Persentase degradasi massa diperoleh sebesar 80% dengan T_{onset} pada 283 °C, T_{max} pada 332 °C dan T_{offset} pada 380 °C.

Perbandingan kurva TG/DTA dari KASA (2%) dengan KASA-DVB pada Gambar 9, yang dipengaruhi oleh penambahan SA dengan variasi 2, 4 dan 6% (b/b) terdapat perbedaan pada persentase degradasi massa yang semakin menurun. Perbandingan nilai T_{max} dari KASA-DVB dapat dilihat pada Gambar 10 dengan adanya penurunan seiring penambahan SA dari 2 ke 4% (b/b) dan mengalami stabilisasi dari 4 ke 6% (b/b). Hal tersebut dikarenakan efek sterik oleh rantai hidrofobik SA yang semakin meningkat sehingga fleksibilitas rantai kopolimer dan homogenitas kopolimer akan menurun pula.

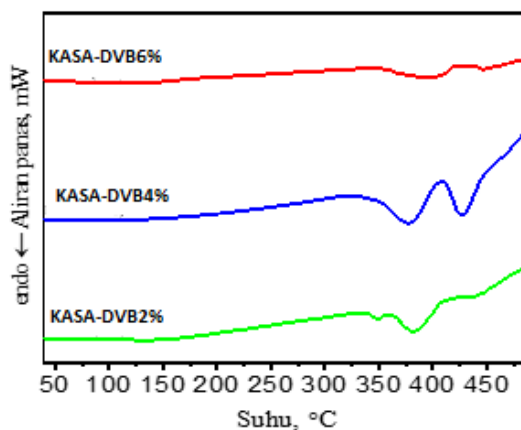


Gambar 9. Perbandingan termogram TGA dari KASA (2%), KASA (2%)-DVB, KASA (4%)-DVB dan KASA (6%)-DVB.



Gambar 10. Perbandingan termogram DTA dari KASA (2%), KASA-DVB-2%, KASA-DVB-4% dan KASA-DVB-6%.

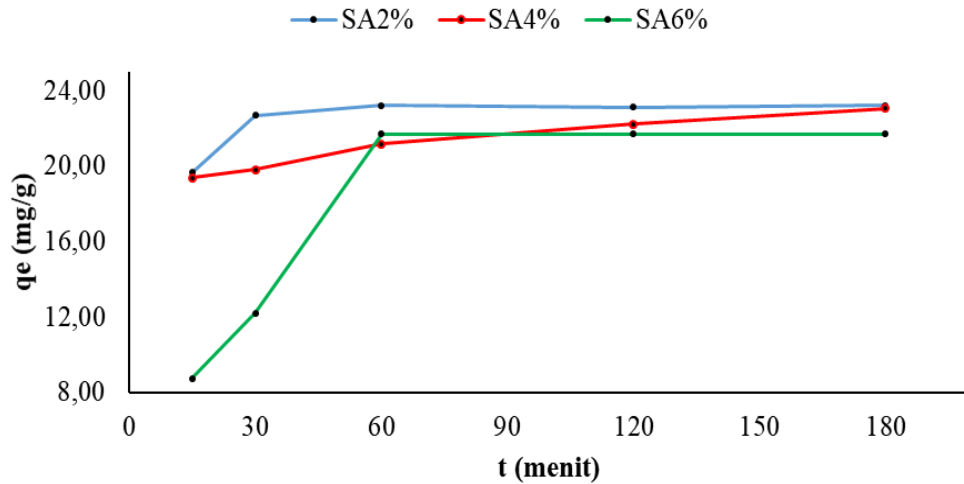
Analisis termogram DSC mengindikasikan nilai T_{endo} dari masing-masing variasi SA seperti pada (Gambar 11). Puncak endotermik dapat mengindikasikan terjadinya pemutusan rantai samping (gugus benzena dan hidrofobik) dan pemutusan rantai sambung-silang (rantai alifatik). Analisis termogram DSC teridentifikasi T_{endo} pada KASA-DVB-2% sebesar 349 dan 382 °C. Begitupun pada KASA-DVB-4% terindikasi nilai T_{endo} sebesar 378 dan 427 °C. Pada KASA-DVB-6% terindikasi nilai T_{endo} sebesar 400 dan 446 °C. Pengaruh penambahan berat SA menyebabkan kenaikan nilai T_{endo} karena semakin banyaknya interaksi dengan rantai samping SA dalam KASA-DVB. Selain itu, tidak adanya titik kristalisasi (T_c) dan titik *transition glass* (T_g) menunjukkan bahwa KASA-DVB yang terbentuk bersifat amorf. Sifat amorf tersebut dapat meningkatkan potensi KASA-DVB menjadi suatu material alternatif adsorben.



Gambar 11. Perbandingan termogram DSC dari KASA-DVB-2%, KASA-DVB-4% dan KASA-DVB-6%.

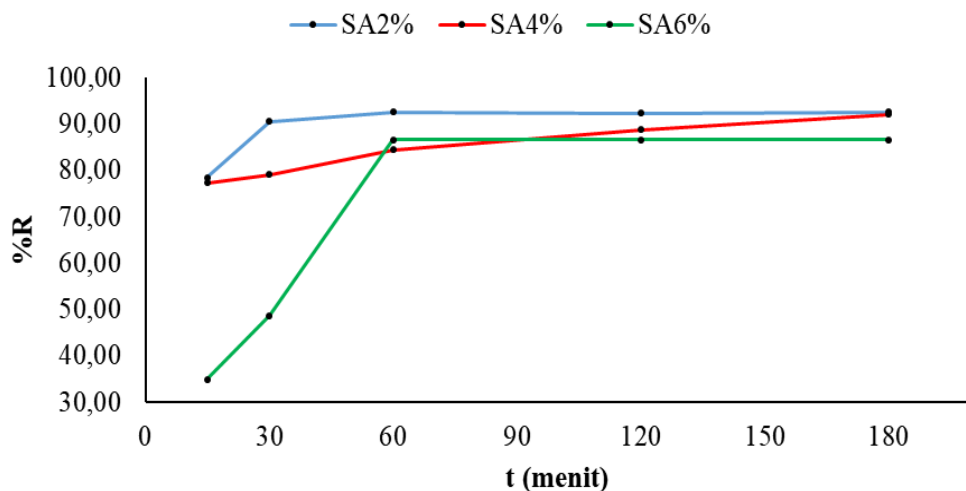
Adsorpsi Senyawa Fenol menggunakan KASA-DVB

Hasil uji adsorpsi fenol ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13, diperoleh nilai q_e berturut-turut dari KASA-DVB-2% adalah 19,68; 22,69; 23,22; 23,14 dan 23,22 dengan nilai %R sebesar 78,49%; 90,51%; 92,61%; 92,31% dan 92,61%.



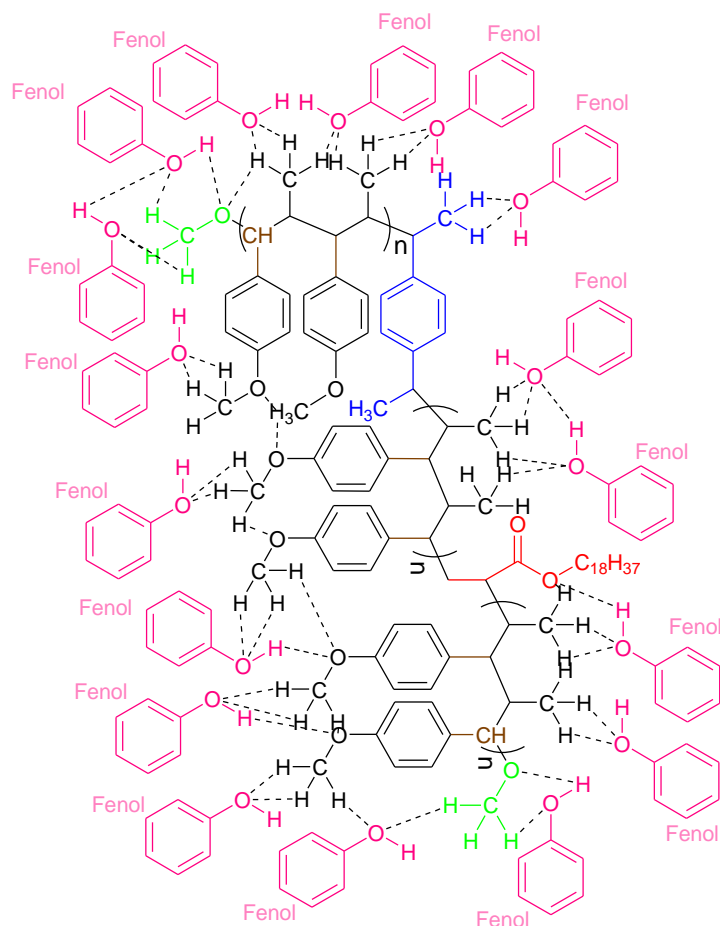
Gambar 12. Kurva kapasitas adsorpsi fenol pada KASA-DVB.

Adapun nilai q_e berturut-turut dari KASA-DVB-4% adalah 19,38; 19,83; 21,18; 22,24 dan 23,06 dengan nilai %R sebesar 77,29; 79,09; 84,50; 88,71; dan 92,01%. Selain itu, nilai q_e berturut-turut dari KASA-DVB-6% adalah 8,76; 12,22; 21,71; 21,71 dan 21,71 dengan nilai %R sebesar 34,94; 48,75; 86,60; 86,60 dan 86,60%.



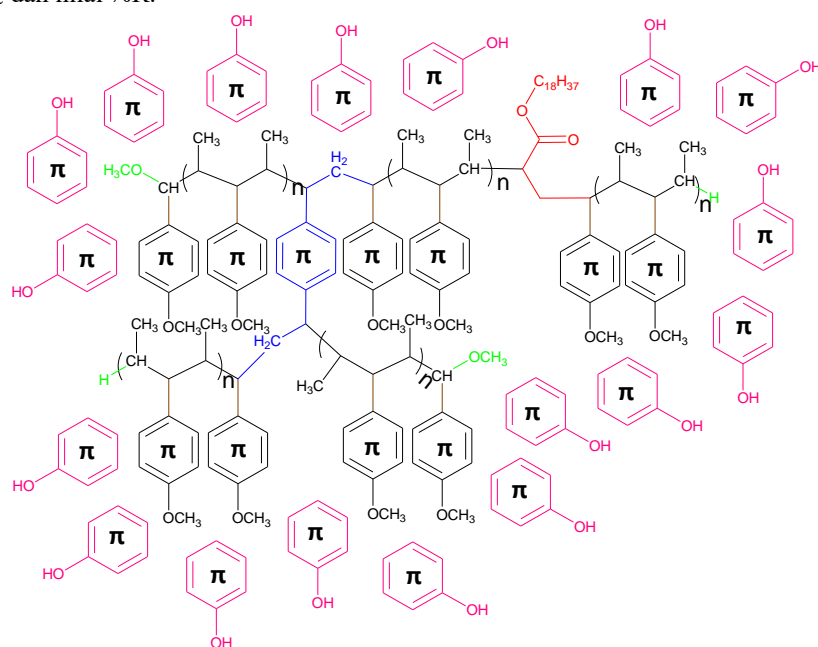
Gambar 13. Kurva persentase fenol teradsorpsi pada KASA-DVB.

Berdasarkan [Gambar 12](#) dan [Gambar 13](#), nilai q_e maksimum diperoleh dari variasi berat SA 2% pada waktu kontak 60 menit yaitu 23,22 (mg/g) dengan nilai %R sebesar 93,61%. Pengaruh penambahan berat SA menyebabkan penurunan nilai q_e dan %R pada KASA-DVB. Hal ini disebabkan oleh peningkatan sifat hidrofobik KASA-DVB sehingga berpengaruh pada penurunan proporsi terbentuknya ikatan hidrogen dan interaksi phi-phi cincin aromatis. Menariknya, ketiga kurva dari masing-masing variasi berat SA mengalami kejenuhan dimulai pada waktu kontak 60–180 menit. Hal tersebut menandakan bahwa KASA-DVB dalam keadaan setimbang pada larutan fenolnya. Mekanisme reaksi adsorpsi fenol terhadap KASA-DVB dapat dilihat pada [Gambar 14](#) dan [Gambar 15](#) dengan potensinya untuk mengadsorpsi fenol bergantung pada adanya ikatan hidrogen dan interaksi phi-phi dari cincin aromatis.



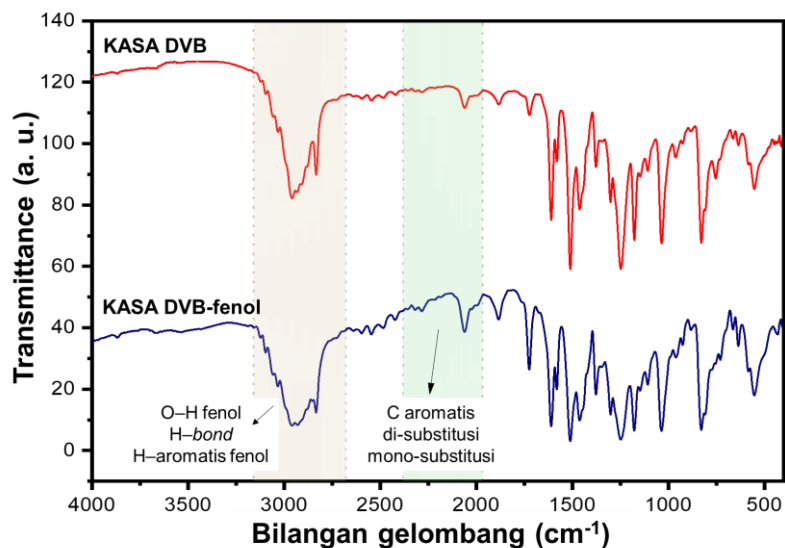
Gambar 14. Prediksi interaksi adsorpsi yang didasarkan oleh ikatan hidrogen.

Ikatan hidrogen terbentuk dari pasangan elektron bebas (PEB) yang dimiliki oleh unsur Oksigen pada KASA-DVB. Adapun ikatan phi-phi dari cincin aromatis terbentuk dari masing masing senyawa anetol, DVB dan Fenol dalam KASA-DVB-Fenol. Tersebar nya gugus-gugus pembentuk ikatan hidrogen dan cincin aromatis di seluruh permukaan KASA-DVB menyebabkan tingkat adsorpsi fenol semakin tinggi. Hal tersebut dapat terindikasi dari penentuan nilai q_e dan nilai %R.



Gambar 15. Prediksi interaksi adsorpsi yang didasarkan oleh interaksi phi-phi elektron cincin aromatis.

Karakterisasi KASA-DVB ditunjukkan oleh analisis gugus fungsi, hidrofobisitas, pembentukan ikatan hidrogen dan pembentukan interaksi phi-phi cincin aromatis. Maka dari itu, KASA-DVB berpotensi menjadi adsorben senyawa fenol (limbah organik). Keberhasilan suatu proses adsorpsi fenol terindikasi dari analisis gugus fungsi yang dapat dilihat pada Gambar 16. Hasil analisis gugus fungsi dari spektra IR hasil adsorpsi fenol menunjukkan bahwa spektra mengalami perubahan dibandingkan dengan sebelum proses adsorpsi. Hal tersebut terindikasi dari perubahan puncak serapan pada rentang serapan 3075-3713 cm^{-1} menjadi 3121-2707 cm^{-1} dengan adanya senyawa fenol (H-aromatis fenol dan gugus -OH) yang berpotensi membentuk ikatan hidrogen. Begitupun dari serapan pada 2375-1990 cm^{-1} mengalami penguatan transmisi dikarenakan hadirnya cincin aromatis dari fenol dan faktor terikan sterik (*steric hindrance*) yang disebabkan oleh interaksi phi-phi dari fenol dan KASA-DVB.



Gambar 16. Spektra IR KASA-DVB hasil adsorpsi fenol.

KESIMPULAN

Keberhasilan sintesis KASA-DVB ditunjukkan dari analisis gugus fungsi dengan hilangnya serapan alil dan vinil pada 1665-1615 cm^{-1} serta analisis jenis proton menunjukkan hilangnya H-alil dan H-vinil pada $\delta_{\text{H}} = 6,71-5,48$ ppm. Karakteristik KASA-DVB ditunjukkan dari peningkatan nilai η_{int} , morfologi diperoleh adanya lekukan dan rongga pada permukaan KASA, serta hasil analisis termal diperoleh penurunan nilai degradasi massa (87, 84, 80, wt%) seiring bertambahnya berat SA. Uji adsorpsi fenol diperoleh nilai kapasitas adsorpsi tertinggi mencapai 23,22 (mg/g) dengan persentase fenol teradsorpsi sebesar 92,61%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

DSH: Supervisi, Penyusunan konsep, Metodologi, Analisis Struktur; EP: Telaah dan Penyuntingan Manuskrip, Karakterisasi, Analisis Data; BIS: Penulisan Draf Manuskrip, Metodologi, Karakterisasi, dan Analisis Data.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Universitas Sebelas Maret yang mendukung pendanaan melalui Hibah Penelitian Grup Riset dengan Nomer Kontrak 228/UN27.22/PT.01.03/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Appiah-Ntiamoaha, R., Kima, H., Gadisaa, B. T., Bayea, A. F., Abebea, M. W., and Kostjuk, S. K. 2018. Degradation kinetics of polyanethole: A newly synthesized green polymer. *Materials Chemistry and Physics*, 219: 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.061>
- Chaudhari, A. K., Singh, V. K., Das, S., Deepika, Singh, B. K. and Dubey, N. K., 2020. Antimicrobial, Aflatoxin

- B1 Inhibitory and Lipid Oxidation Suppressing Potential of Anethole-Based Chitosan Nanoemulsion as Novel Preservative for Protection of Stored Maize. *Food and Bioprocess Technology*, 13(8), 1462–1477. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02479-w>.
- Handayani, D. S., Kusumaningsih, T. and Muslimin, 1997. Sintesis Kopoli(Anetol-DVB) Sulfonat Sebagai Bahan Alternatif Resin Penukar Kation. *Jurnal Teknik Industri Pertanian*, 17(2), 43-48. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnaltin/article/view/4217>.
- Handayani, D. S., Kusumaningsih, T. and Yuli, M., 2004. Synthesis of Co-Poly(Eugenol Sulfonate)-DVB from Eugenol as a Major Component of Syzygium Aromaticum Oils. *Biofarmasi Journal of Natural Product Biochemistry*, 2(2), 53–57. <https://doi.org/10.13057/biofar/f020202>.
- He, F., Gao, Y., Jin, K., Wang, J., Sun, J. and Fang, Q., 2016. Conversion of a Biorenewable Plant Oil (Anethole) to a New Fluoropolymer with Both Low Dielectric Constant and Low Water Uptake. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(8), 4451–4456. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01065>.
- Hirashima, S., Kudo, Y., Nobuta, T., Tada, N. and Itoh, A., 2009. Aerobic Photo-Oxidative Cleavage of the C-C Double Bonds of Styrenes. *Tetrahedron Letters*, 50(30), 4328–4330. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2009.05.012>.
- Hirose, M., Zhou, J. and Nagai, K., 2000. The Structure and Properties of Acrylic-Polyurethane Hybrid Emulsions. *Progress in Organic Coatings*, 38(1), 27–34. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(99\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(99)00081-8).
- Huang, S., Dong, R., Xu, G., Liu, J., Gao, X., Yu, S., Qie, P., Gou, G., Hu, M. and Wang, Y., 2020. Synthesis, Characterization, and in Vivo Evaluation of Desmethyl Anethole Trithione Phosphate Prodrug for Ameliorating Cerebral Ischemia-Reperfusion Injury in Rats. *ACS Omega*, 5(9), 4595–4602. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04129>.
- Lai, S. and Lee, D. G., 2001. Heterogeneous Permanganate Oxidation of Styrene and Cinnamic Acid Derivatives: A Simple and Effective Method for the Preparation of Benzaldehydes. *Synthesis*, 11, 1645–1648. <http://dx.doi.org/10.1055/s-2001-16760>.
- Lèvéque, J. L. and Saint-Lèger, D., 2002. Salicylic Acid and Derivatives. *Skin Moisturization*. Marcel Dekker Inc., New York.
- Liang, F., 2012. Synthesis and Properties of Acrylate Modified Waterborne Polyurethane Emulsion, *Advanced Materials Research*, 537, 1386–1392. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1386>.
- Ma, L., Song, L., Li, F., Wang, H. and Liu, B., 2017. Preparation and Properties of Poly (Propylene Carbonate)-Based Waterborne Polyurethane-Acrylate Composite Emulsion. *Colloid Polym Science*, 295(12), 1-10. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00396-017-4198-2>.
- Mandal, A. and Das, S. K., 2019. Phenol Adsorption from Wastewater Using Clarified Sludge from Basic Oxygen Furnace. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103259. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103259>.
- parMcIntyre, D., 2015. Characterisation. *The Cambridge Handbook of Stylistics*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139237031.013>.
- McLachlan, G., Baker, A., Tennant, P., Gordon, C., Vrettou, C., Renwick, L., Blundell, R., Cheng, S. H., Scheule, R. K., Davies, L., Painter, H., Coles, R. L., Lawton, A. E., Marriott, C., Gill, D. R., Hyde, S. C., Griesenbach, U., Alton, E. W. F. W., Boyd, A. C., Porteous, D. J. and Collie, D. D. S., 2007. Optimizing Aerosol Gene Delivery and Expression in the Ovine Lung. *Molecular Therapy*, 15(2), 348–354. <https://doi.org/10.1038/sj.mt.6300058>.
- Mori, H. and Müller, A. H. E., 2003. New Polymeric Architectures with (Meth)Acrylic Acid Segments. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 28(10), 1403–1439. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700\(03\)00076-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700(03)00076-5).
- Nirmala, G., Murugesan, T., Rambabu, K., Sathiyarayanan, K. and Show, P. L., 2019. Adsorptive Removal of Phenol Using Banyan Root Activated Carbon. *Chemical Engineering Communications*, 208(6), 831–842. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1674839>.
- Pappoppula, K. T., 2020. *Asia to lead global acrylic acid capacity additions by 2024, says GlobalData*. <<https://www.globaldata.com/asia-lead-global-acrylic-acid-capacity-additions-2024-says-globaldata/>> (diakses pada).
- Peruzzo, P. J., Anbinder, P. S., Pardini, O. R., Vega, J., Costa, C. A., Galembeck, F. and Amalvy, J. I., 2011. Waterborne Polyurethane/Acrylate: Comparison of Hybrid and Blend Systems. *Progress in Organic Coatings*, 72(3), 429–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.016>.
- Prax, M., Shahmirzadi, S. V. and Götz, F., 2015. Sodium Polyanethol Sulfonate (SPS) Falsifies Protein Staining and Quanti Fi Cation and How to Solve This Problem. *Journal of Microbiological Methods*, 118, 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2015.10.002>.

- Putnam, D., 2006. Polymers for Gene Delivery across Length Scales. *Nature Materials*, 5(6), 439–451. <https://doi.org/10.1038/nmat1645>.
- Raza, S., Yong, X., Raza, M. and Deng, J., 2018. Synthesis of Biomass *Trans*-Anethole Based Magnetic Hollow Polymer Particles and Their Applications as Renewable Adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 352, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.185>.
- Rostiana, O., 2016. Perbanyakan Tanaman Anis (*Pimpinella Anisum* L.) Secara In Vitro. *Buletin Penelitian Tanaman Rempah Dan Obat*, 18(2), 117–26.
- Samal, S. K., Dash, M., Vlierberghe, S. V., Kaplan, D. L., Chiellini, E., Blitterswijk, C., Moroni, L. and Dubruel, P., 2012. Cationic Polymers and Their Therapeutic Potential. *Chemical Society Reviews*, 41(21), 7147–7194. <https://doi.org/10.1039/C2CS35094G>.
- Sheng, L., Zhang, X., Ge, Z., Liang, Z., Liu, X., Chai, C. and Luo, Y., 2018. Preparation and Properties of Waterborne Polyurethane Modified by Stearyl Acrylate for Water Repellents. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15(6), 1283–1292. <http://dx.doi.org/10.1007/s11998-018-0096-x>.
- Slamet, R., Arbianti, R. and Daryanto, 2005. Pengolahan Limbah Organik (Fenol) Dan Logam Berat (Cr^{6+} Atau Pt^{4+}) Secara Simultan Dengan Fotokatalis TiO_2 , ZnO-TiO_2 , Dan CdS-TiO_2 . *MAKARA of Technology Series*, 9(2), 66–71. <https://dx.doi.org/10.7454/mst.v9i2.363>.
- Thuy, L., Nguyen T., Takemura, A. J., Ohniwa, R. L., Saito, S. and Morikawa, K., 2018. Sodium Polyanethol Sulfonate Modulates Natural Transformation of SigH-Expressing *Staphylococcus Aureus*. *Current Microbiology*, 75(4), 499–504. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00284-017-1409-5>.
- Wang, C., Sun, J., Tao, Y., Fang, L., Zhou, J., Dai, M., Liu, M. and Fang, Q., 2020. Biomass Materials Derived from Anethole: Conversion and Application. *Polymer Chemistry*, 11(5), 954–963. <http://dx.doi.org/10.1039/C9PY01513B>.
- Wang, X., Wang, H. and Sun, Y., 2017. Synthesis of Acrylic Acid Derivatives from CO_2 and Ethylene. *Chem*, 3(2), 211–228. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.07.006>.
- Xu, Y., Wang, C., Hou, J., Wang, P., You, G., Miao, L., Lv, B., Yang, Y. and Zhang, F., 2017. Application of Zero Valent Iron Coupling with Biological Process for Wastewater Treatment: A Review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 16(4), 667–693. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11157-017-9445-y>.
- Zhang, C., Zhang, X., Dai, J. and Bai, C., 2008. Synthesis and Properties of PDMS Modified Waterborne Polyurethane – Acrylic Hybrid Emulsion by Solvent-Free Method. *Progress in Organic Coatings*, 63(2), 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.05.011>.
- Zhang, K., Han, M., Liu, Y. and Froimowicz, P., 2019. Design and Synthesis of Bio-Based High-Performance Trioxazine Benzoxazine Resin via Natural Renewable Resources. Research-article. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(10), 9399–9407. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00603>.