

Mengel van stireenbutadienrubber/natuurlike rubber met grafeeninsluiting (BR/NR/GE): 'n Oorsig

RS Mohlamonyane,¹ ER Sadiku,¹ SS Ray^{2,3}

¹Instituut vir Nano-ingenieurswesensavorsing (ININ), Departement Chemie, Metallurgiese en Materiaalingenieurswese, Tshwane Universiteit van Technologie, Suid-Afrika

²DWT/WNNR Nasionale Sentrum vir Nanogestruktureerde Materiale (NSNSM), Suid-Afrika

³Departement Toegepaste Chemie, Universiteit van Johannesburg, Suid-Afrika

Korresponderende outeur: RS Mohlamonyane **E-pos:** raymondmohlamonyane@gmail.com

Rubber word in verskillende omgewingstoestande gebruik. Omdat hulle intrinsiek hoogs elasties is maar oor relatief lae sterkte beskik, kan rubber nie sommige van die spannings wat daarop uitgeoefen word, doeltreffend weerstaan nie. Ten einde die elektriese geleidingsvermoë, styfheid en termiese sterkte van natuurlike en sintetiese rubbermengels te verbeter, kan grafeen 'n geskikte kandidaat wees om as bymiddel/vulstof gebruik te word. Hierdie studie bied 'n oorsig van die invloed van die mengeltegnieke wat gebruik word, van mengbaarheid, en van hoe grafeen in mengels van stireenbutadienrubber (SBR)/natuurlike rubber (NR) geïnkorporeer kan word.

Sleutelwoorde: natuurlike rubber, sintetiese rubber, grafeen, bymiddel/vulstof

Blend of Styrene Butadiene Rubber/Natural Rubber with Graphene Inclusion (BR/NR/GE): A review: Rubbers are used in different environmental conditions. Due to their intrinsic nature of being highly elastic and their relatively low strength, rubbers cannot efficiently resist some of the stresses applied to them. In order to improve the electrical conductivity, stiffness and thermal strength of natural and synthetic rubber blends, graphene can be used as a suitable candidate as additive/filler. The study will review the influence of the blending techniques employed, miscibility, and how graphene can be incorporated into the styrene-butadiene rubber (SBR)/natural rubber (NR) blends.

Keywords: natural rubber, synthetic rubber, graphene, additive/filler

Inleiding en agtergrond

'n Polimeermengel word omskryf as 'n mengsel van twee of meer polimere. Polimeermengels word vervaardig om 'n nuwe polimeersamestelling met ander fisiese eienskappe as bestaande aanvangsmaterialie te skep of te produseer. Kombinasies van polimere kan vervaardig word om polimeermengels te produseer met eienskappe wat van dié van die individuele komponente verskil. 'n Metallurg genaamd Alexander Parkes het in 1846 die eerste polimeermengel uitgevind. Die mengsel is gemaak van drie polimere, naamlik sellulosenitrat, natuurlike rubber en guttapertsja. Hierdie mengsel deur Alexander Parkes het in gewildheid toegeneem nadat daar gevind is dat dit suksesvol in elektriese isolasie, in wondbeskerming en in fotografie gebruik kon word (White, 1998).

Daar is 'n beduidende aantal redes vir die vervaardiging van polimeermengels, waarvan sommige hierbo genoem is. Ten einde polimeermengels te vervaardig is daar faktore wat in aanmerking geneem moet word. Nog een is die dispersiteit van die bymiddel in die matriks. Baie navorsers het op bymiddels afgekom wat maklik agglomereer wanneer hulle in 'n polimeermatriks geïnkorporeer word. Daarom word bymiddels

soos grafeen gefunksionaliseer voordat dit in 'n matriks geïnkorporeer kan word, ten einde agglomerasie te vermy.

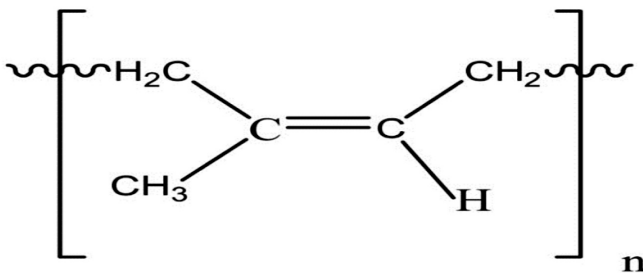
Om 'n rubbersamestelling te vervaardig, word 'n standaardproses gebruik om die rubbermatriks te kruisbind, wat vulkanisering genoem word. Goodyear het die vulkaniseringsproses in 1839 ontdek. Goodyear het natuurlike rubber gemeng met swael in 'n temperatuurbestek van 130–180 °C verhit en 'n chemiese reaksie waargeneem. Die mengsel word as gevolg van die swael verhard en vorm 'n kruisbinding met natuurlike rubber (Ileda, 2014). Die mengsel van rubber en swael het egter een of ander vorm van netwerk-inhomogeniteit. Die ontwikkeling van nuwe maniere waarop rubber gevulkaniseer kan word sonder dat dit 'n netwerk-inhomogeniteit toon, is van kardinale belang.

Mansilla, et al., (2016) het gevind dat elastomeriese mengels verbeterde eienskappe getoon het vergeleke met verbindinge wat van suiwer elastomere gemaak is. Elastomeriese mengels word in die meeste gevalle met deeltjies versterk om hul eienskappe te verbeter. Vulstowwe wat gewoonlik in die rubberbedryf gebruik word, is koolswart, silikaat en koolstofnanobuis. Sommige van die gelyste vullers is egter nie omgewingsvriendelik nie, terwyl andere nie diestrukturele sowel as niestructurele funksies van elastomere verbeter nie.

Hierdie studie doen 'n oorsig van mengels van stireenbutadieenrubber/natuurlike rubber, in teenstelling met rubbermengels oor die algemeen. Hierdie oorsig fokus meer op die aanwending van mengels van stireenbutadieen/natuurlike rubber, die belangrikheid van die vervaardigingsmetodes, die verskillende bymiddels wat tipies in die rubberbedryf gebruik word, en op bymiddels wat tans na vore tree en die rubberbedryf ten goede kan verander.

Mengels van stireenbutadieenrubber/natuurlike rubber

Natuurlike rubber word verkry uit die *Hevea brasiliensis*-boom, 'n plant inheems aan die tropiese Amerikas is, in die vorm van lateks (Cornish, 2014). Konvensionele natuurlike rubber is elasties en buigsaam. Hierdie eienskappe stel natuurlike rubber in staat om na die oorspronklike vorm terug te keer nadat 'n toegepaste spanning verwyder is. In die wetenskap en ingenieurswese is natuurlike rubber bekend as *cis*-1,4-poliisopreen (Puskas, et al., 2014). Figuur 1 toon die chemiese struktuur van *cis*-1,4-poliisopreen.

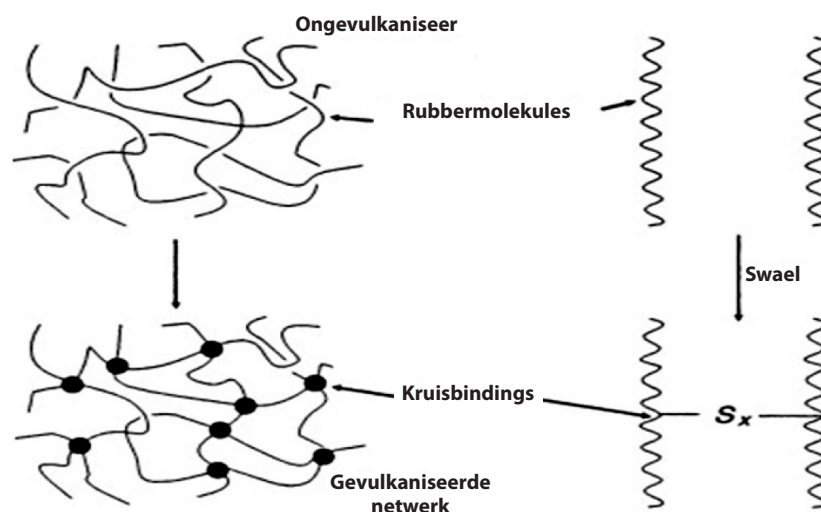


Figuur 1: Chemiese struktuur van *cis*-1,4 poliisopreen, 'n natuurlike rubber (Ferreira, et al. 2009)

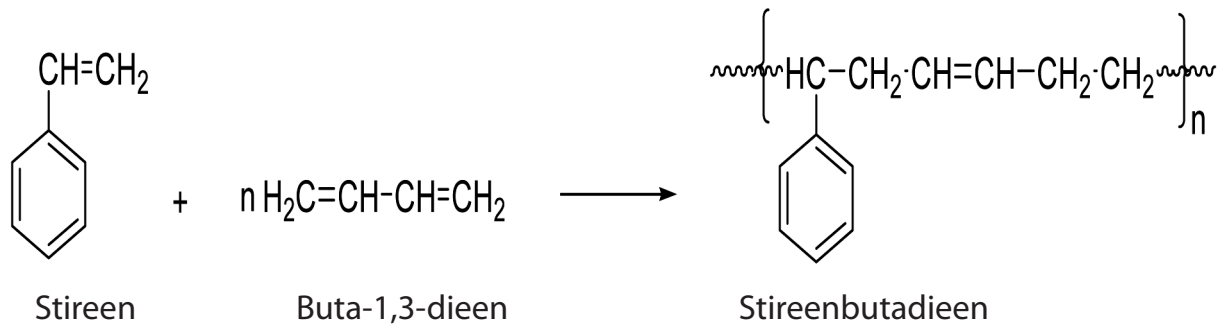
As gevolg van die natuurlike rubber se goeie eienskappe, soos hoë treksterkte, elastisiteit, buigsaamheid, bestandheid teen vermoeidheid en virale deurdringing, is natuurlike rubber wyd as die polimeermatriks in die vervaardiging van bande, handskoene, kondome, ens. aangewend. Natuurlike rubber is bioafbreekbaar, en hierdie eienskap maak dit die enigste elastomeer

wat omgewingsvriendelik is vir sover dit bioafbreekbaarheid betref (Matos, et al., 2014). In 1844 het Charles Goodyear per abuis swael met natuurlike rubber gemeng, en daardeur veroorsaak dat natuurlike rubber veerkragtig word terwyl die elastisiteit daarvan behoue gebly het (Puskas, et al., 2014). Chemies vorm swael kruisbindings met klein kettings natuurlike rubber. Die hele proses word vulkanisering genoem, waardeur natuurlike rubber by 'n temperatuur van 150 °C deur die proses van verharding gaan. Om natuurlike rubber mededingend te maak, maar ook om in meganiese behoeftes te voorsien, is daar vulkaniseringspakkette wat gebruik word om die eienskappe van natuurlike rubber te verbeter. In die verharding van natuurlike rubber, wat bekend staan as vulkanisering, is daar hoofbestanddele wat verharding doeltreffend en ekonomies maak, en hierdie bestanddele is 'n swaelversneller, metaaloksied en vetsuur. Sinkoksied is 'n metaaloksied wat nog 'n standaardbymiddel is, dit wil sê, by natuurlike rubber gevoeg word om die bestandheid van natuurlike rubber teen hitte- en ultravioletafbreking te verbeter. Daar is meer as 50 versnellers wat tans op kommersiële skaal gebruik word. Die versnellers in die tipiese vulkanisasiestelsel word bygevoeg om die spoed van vulkanisering te verhoog, maar ook om vulkanisering by laer temperature te laat plaasvind.

Stireenbutadieenrubber (SBR) is 'n sintetiese rubber wat gemaak word deur die kopolimerisasie van stireen- en butadieenmonomere (Figuur 3). SBR bestaan uit 1025% stireen- en 6070% butadieenmonomere. Hierdie rubber is gesintetiseer omdat sommige lande tydens die Tweede Wêreldoorlog nie natuurlike rubber uit tropiese lande kon invoer nie, en daarom was die doel om 'n rubber te sintetiseer wat 'n plaasvervanger vir natuurlike rubber kon wees. Die SBR-nanosamestellings word gebruik om produkte soos motorbande, skoene, gordels en ander industriële produkte te vervaardig. Die belangrikste voordele van die gebruik van SBR as 'n polimeermatriks is eienskappe soos slytweerstand, impaksterkte en hoë treksterkte. SBR word dikwels gevulkaniseer deur dieselfde middels te gebruik wat gebruik word vir die vulkanisering van natuurlike rubber. SBR-werkverrigting is swak indien dit nie versterk word nie, en silika is die konvensionele versterking wat gebruik word om die meganiese eienskappe van SBR te verbeter.



Figuur 2: Kruisbinding van rubbernetwerke (Coran, 2003)



Figuur 3: Die resulterende chemiese struktuur van stireenbutadienrubber, 'n sintetiese rubber

Natuurlike rubber beskik oor goeie meganiese en dinamiese eienskappe. Dit het egter nadele, soos lae weerbestandheid, 'n gebrek aan oliebestandheid en swak slytweerstand, wat dit nodig maak om dit met stireenbutadienrubber te meng om sommige van die eienskappe te verbeter. Die NR/SBR-mengels word in 'n wye verskeidenheid toepassings gebruik, soos in die verdedigings-, motor-, lugvaart-, konstruksie-, mediesesorg- en voedselbedryf.

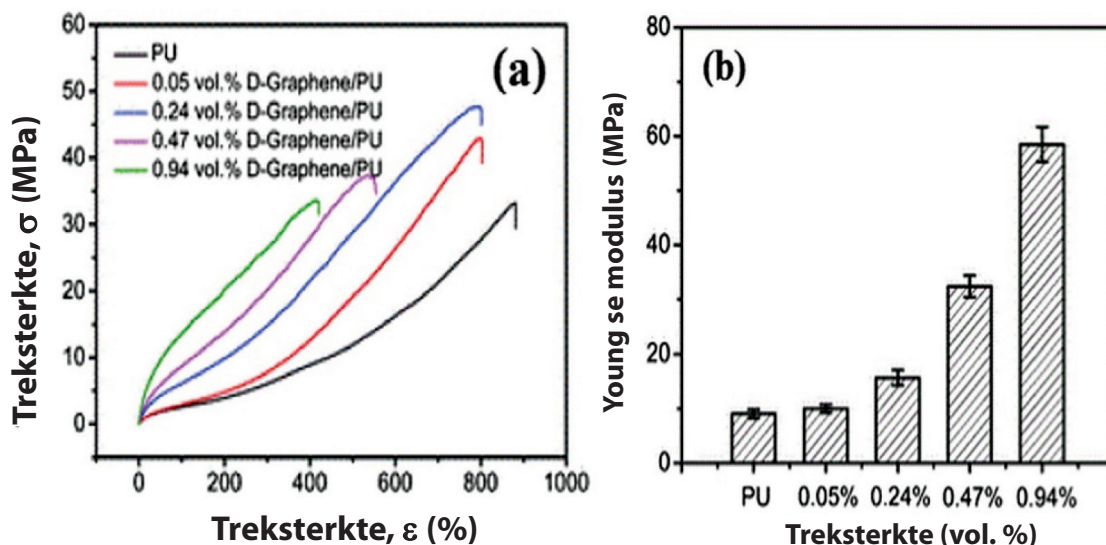
Grafeen as vuller om rubber te versterk

Die konvensionele vulstof wat gebruik word om SBR/NR-mengels te versterk, is koolswart. Die voorloper van koolswart is egter ru-olie, en die voorbereidingsprosesse genereer oormatige hoeveelhede afvalprodukte (Kang, et al, 2017). Gevolglik is dit noodsaaklik om navorsing te doen oor nuwe vullers wat in die rubbermatriks ingewerk kan word sonder om die omgewing te benadeel. Grafeen as 'n vuller in SBR/NR-mengels toon baie potensiaal, wat dit geskik maak om koolswart te vervang en nuwe eienskappe aan rubbermengelsamestellings toe te voeg.

Grafeen is 'n allotroop van koolstof in die vorm van 'n enkele laag atome in 'n tweedimensionele heuningkoekvormige roosterstruktuur, waarin een atoom elke hoekpunt beset. Grafeen is geïdentifiseer as 'n goeie kandidaatvulstof vir baie

polimere om hul multifunksionaliteit te bereik, gegewe die omvangryke eienskappe daarvan, soos 'n groot oppervlakte, hoë gasprestasieversperring, goeie meganiese eienskappe en uitstekende elektriese en termiese geleidingsvermoë (Zhang, et al., 2019). Grafeen word in baie vorme aangetref; die formaat daarvan hang af van die aantal koolstoflae wat die grafeen het. Op die mark is daar grafeen met 1-3 lae koolstof beskikbaar, sowel as multilaaggrafeen, wat ook grafeennanoplaatjies genoem word en wat 2-10 lae koolstof bevat (Mason, 2020).

Die literatuur het geen beduidende inligting oor SBR/NR-mengels wat met grafeen versterk is, gerapporteer nie, dus doen hierdie studie 'n oorsig van rubbermengels wat met grafeen versterk is. Grafeen is na berig word 'n beduidende vulstof wat in die rubberbedryf bestudeer moet word. Die beperkings wat met grafeen geassosieer word, is dat dit agglomerer wanneer dit in rubbermengels geïnkorporeer word. Om die agglomerasie van grafeen in die rubbermatriks te bowe te kom, kan grafeen gefunksionaliseer word. Grafeen word gefunksionaliseer as gevolg van modifikasie vir goeie dispersiteit, wat dikwels 'n impak het op die meganiese eienskappe van die resulterende rubbersamestellings. Figuur 4 toon die invloed van grafeen op meganiese eienskappe van poliuretaanrubber (PU). Die meganiese eienskappe van PU neem inkrementeel toe na gelang van die verskillende grafeenladings.



Figuur 4: (a) Kenmerke van spanning-vervormingskrommes vir die PU/grafeen (b) Young se modulus van PU/grafeen (Papageorgiou, et al., 2017)

Die Hummers-metode is 'n standaardmetode wat gebruik word om grafeen te funksionaliseer. Dikwels word natuurlike grafiet as 'n voorloper gebruik om grafeenoksied volgens die gemoediseerde Hummers-metode te sintetiseer. Sterk oksidante soos gekonsentreerde swaelsuur, kaliumnitraatsuur en kaliumpermanganaat word gebruik om grafiet te oksideer (Sohail, et al., 2017). Grafeenoksied kan in 'n oksidasieproses geproduseer word deur funksionele groepe op die basale vlak (hidroksiel- en epoksiegroepe) en randvlakke (karboksiesuurgroepe) te produseer. Hierdie funksionele groepe wat in die basale vlak en die randvlakke van grafeenoksied voorkom, is hidrofilies aangesien hulle suurstofgroepe bevat wat die grafeenoksied in staat stel om oplosbaar te wees (Shang, et al., 2019).

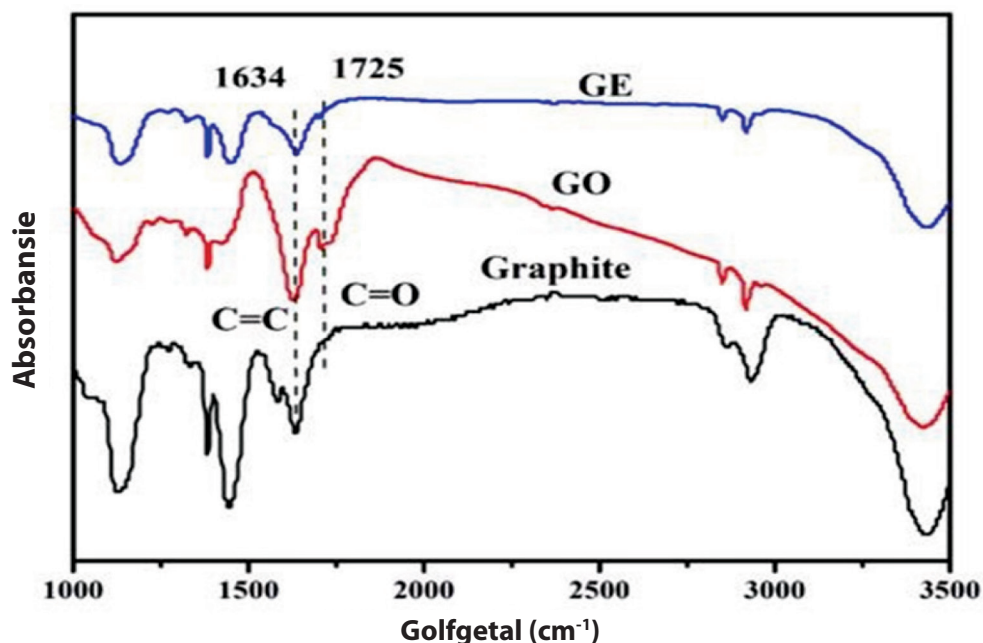
Geoksigeneerde grafeen gelei elektrisiteit swak en het swak termiese stabiliteit. Waterstofhidrasien kan by 'n grafeenoksied/rubberlateksoplossing gevoeg word om die suurstofgroepe te deoksigeneer of te verminder ten einde beide die elektriese geleidingsvermoë en termiese stabiliteit van die resulterende samestellings te herstel (Su, et al., 2010). Die gebruik van waterstofhidrasien om elektriese en termiese stabiliteit te herstel, verswak egter die eienskappe van die polimeermatriks indien dunlaagnanosamestellings vervaardig moet word (Lim, et al., 2019).

Kang, et al., (2017) het Fourier-transformasie-infrarooispektroskopie (FTIR) gebruik om die chemiese verandering vanaf onversteurde grafiet tot grafeenoksied en tot gereduseerde grafeenoksied te monitor. FTIR is gebruik om die teenwoordigheid van funksionele groepe te evalueer. Die skrywers het gevind dat, ná die byvoeging van hidrasienhidraat, die C=O-absorpsiepiek van grafeenoksied uit die FTIR-spektra verdwyn het. Hidrasienhidraat het suurstofgroepe op die oppervlak van grafeenoksied suksesvol verminder. Kang, et al., (2017) het X-straaldiffraksie gebruik om die tussenlaagspasiëringpatrone

van die bogenoemde monsters te ontleed. Die tussenlaag-*d*-spasiëring van grafeenoksied is groter as dié van grafiet. Dit is omdat die oksidasieproses die afstand tussen die grafeenplate vergroot het.

Zhang, et al., (2019) het Raman-spektroskopie gebruik, wat toegerus is met 'n 532 nm-golfengetelaser en 'n 50X-objektieflens om die afskilfering van grafiet tot grafeenoksied (GO) te evalueer. Hulle het GO voorberei deur van die gemoediseerde Hummers-metode gebruik te maak. Die *D*- en *G*-bande van GO is onderskeidelik by golfgetalle van 1356 cm^{-1} en 1590 cm^{-1} waargeneem. Hierdie resultate word toegeskryf aan die feit dat die afskilfering suksesvol was, aangesien dit die in-fase-strekkvibrasie van die CC-bindings in die grafietrooster en die wanorde in die grafietvel is.

Dong, et al., (2020) het die funksionaliseringsvermoëns van N-sikloheksiel-2-bensotiasoosulfenamied (CZ) en hidrasienhidraat (HH) bestudeer, wat gebruik kan word om met die deagglomerering van grafeen (G) te help en dus 'n eenvormig verspreide grafeen en goeie koppelvlakinteraksie met SBR/NR-mengels te verkry. Die skrywers het gevind dat, met HH-G in die polimeermengel geïnkorporeer, HH-G-velle met baie lae in die rubbermatriks opgestapel word, wat op die swak dispergering van HH-G dui, terwyl CZ-G-velle byna monoverspreid is in die rubbermatriks. Die skrywers het gerapporteer dat die oppervlak van die CZ-G met die polimeermatriks grof en die koppelvlaksgone tussen CZ-G en die rubberfase vaag is, wat sodoende die goeie verenigbaarheid en sterk koppelvlakinteraksie tussen CZ-G en rubbermengels bewys. Die voordeel van CZ is dat dit ook deel van die vulkaniseringsvulstowwe is. Deur dit dus as 'n funksionaliseerder te gebruik, kan die koste verlaag word, sowel as die aantal vulstowwe wat na verwagting in die polimeermengels geïnkorporeer sal moet word.



Figuur 5: Fourier-transformasie-infrarooi om die chemiese verandering van onversteurde grafiet tot grafeenoksied en tot gereduseerde grafeenoksied te monitor (Kang, et al., 2017)

Vervaardigingsmetodes van NR/SBR-mengel

Daar is verskeie metodes wat gebruik word om rubber-nanosamestellings te vervaardig. Waar nanopartikels egter by die versterking van rubber betrokke is, maak oplossing-vermenging, lateksvermenging, smeltvermenging en warm-smeltingsuitpersing die meerderheid uit van die vervaardigings-tegnieke wat gebruik word om rubbernanosamestellings voor te berei. Elke vervaardigingsmetode hou voordele sowel as nadele in. 'n Polimeermengel is die fisiese mengsel van twee of meer polimere sonder dat daar enige chemiese reaksie-binding tussen hulle plaasvind, dus is die vervaardigingstegniek van polimeermengels noodsaaklik aangesien dit in 'n baie groot mate tot die eienskappe van die mengels bydra. Dit is van kardinale belang om 'n vervaardigingsmetode te kies wat in ooreenstemming is met die eienskappe wat verlang word, aangesien die tegniek 'n invloed op die morfologie en interaksie van die twee polimere kan uitoefen.

Lateksvermenging is die vermenging van 'n polimeer in die vorm van 'n lateks, gevolg deur droging of stolling. In die mengproses kan vullers sonder probleme bygevoeg word en kan ander prosesse soos ultrasonikasie uitgevoer word. Daar is gerapporteer dat waar die lateksmengel tegniek gebruik word, vullers eweredig versprei. Verder verminder hierdie tegniek probleme soos chemiese veranderinge wat deur hitte en wrywing veroorsaak word. Die nadeel van lateksvermenging is dat dit nog nie wyd in nywerhede ondersoek is nie. Dit word meestal vir navorsingsdoeleindes gebruik.

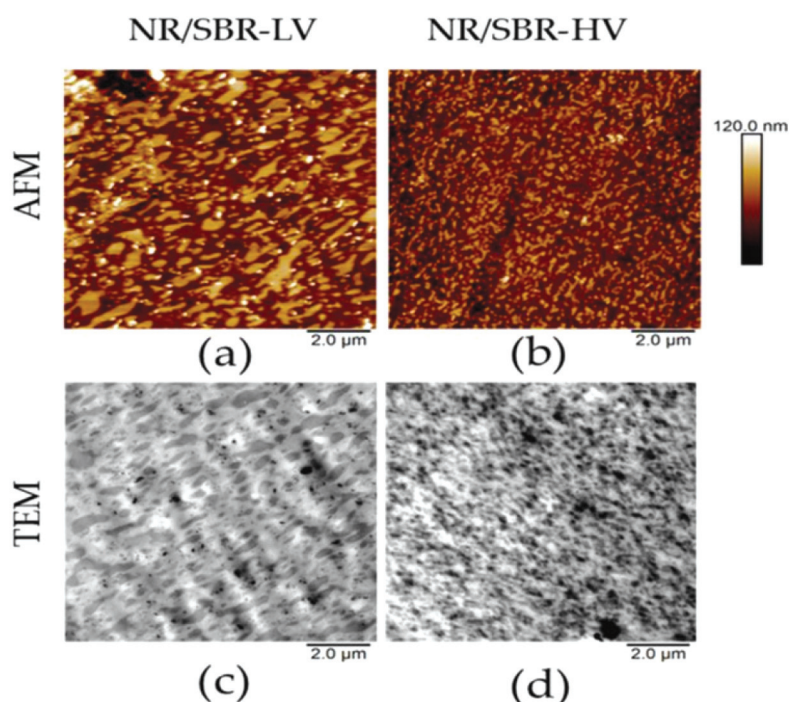
Die elektrostatiese adhesiemeganisme het bewys dat dit effektief is wanneer 'n lateksmengel tegniek gebruik word om natuurlike en sintetiese rubber te meng. Die ioonmigrasie van die natuurlike na die sintetiese rubber verhoog die adhesie en kohesie van die sintetiese/natuurlike rubber in die mengels

(Linares, et al., 2010). Daarom kan ioonmigrasie die verenigbaarheid van die polimeermengels verander, wat ook bydra tot die verbetering van die meganiese eienskappe daarvan. Jose, et al., (2005) het mengels van polivinylchloried (PVC) en natuurlike rubber wat deur lateks- en droë vermenging voorberei is, vergelyk. Die skrywers het bevind dat met lateksvermenging die verouderingsweerstand, olieweerstand en prosesbaarheid van PVC/NR-mengels verbeter het, vergeleke met dié wat deur droë vermenging voorberei is.

Verenigbaarheid van SBR/NR-mengels

Rubbermengels word in twee tipes geklassifiseer, naamlik onmengbare en mengbare mengels (Kaliyathan, et al., 2020). Die onmengbare rubbermengels word ook heterogene mengels genoem. Die onmengbare mengels, geëvalueer onder 'n mikroskoop, dui op 'n fasegesegregerde morfologie. Dit is bekend dat hulle swak adhesie het, en daarom is 'n verenigbaarheidsmiddel nodig wanneer sulke rubbersoorte gemeng moet word. Daarteenoor is mengbare rubbermengels homogeen en verenigbaar. Daar is gerapporteer dat verenigbare mengels beter meganiese eienskappe toon vergeleke met onverenigbare mengels; dus is verenigbare mengels maklik en relatief goedkoop om te vervaardig of te vorm (Mohamed, 2005). Daar is geen mengbare natuurlike rubbermengels op die mark nie as gevolg van die hidrofobiese eienskappe van natuurlike rubber. Die verbetering van mengbaarheid wat bereik kan word waar natuurlike rubber betrokke is, is gedeeltelike mengbaarheid. Daardeur kan die verbeterde eienskappe waargeneem word, vergeleke met totaal onmengbare rubbermengels (Cook, 2021).

Transmissie-elektronmikroskopie (TEM), dinamiese meganiese analise (DMA), differensiële skandeerkalorimetrie (DSK) en atoomkragsmikroskopie (AKM) is tegnieke wat gebruik word om die mengbaarheid van polimeermengels te karakteriseer (Pichayakorn, et al., 2013). TEM kan wel die mengelmorfologie karakteriseer, maar die monstervoorbereiding is tydrowend. DMA en DSK karakteriseer die mengbaarheid indirek sonder om inligting oor die mengelmorfologie te voorsien. Daarteenoor bied AKM vinniger monstervoorbereiding en verstaanbare inligting oor die morfologie van die mengels (Jeon, et al, 2003). Klat, et al., (2018) het die AKM-tegniek bestudeer deur die resultate van die fasemorfologieë van NR/SBR-mengels wat deur AKM en TEM verkry is te vergelyk. Die skrywers het gevind dat die AKM-tegniek vinniger monstervoorbereiding bied, en weereens is die fasemorfologie van die mengels wat deur TEM verkry is soortgelyk aan dié wat deur AKM verkry is. Klat, et al., (2018) het tot die gevolgtrekking gekom dat AKM een van die beste tegnieke is om die mengbaarheid van polimeermengels te karakteriseer. Die mengbaarheid van NR/SBR-mengels verbeter met 'n verhoging van die vinielinhoud. In Figuur 6 het die skrywer die topografiese kaarte van lae vinielinhoud (LV) en hoë vinielinhoud (HV) van NR/SBR-mengels vergelyk.



Figuur 6: Vergelyking van AKM-topografiekaarte met TEM-beelde: AKM-topografiekaarte van (a) NR/SBR-LV en (b) NR/SBR-HV, en TEM-beelde van (c) NR/SBR-LV en (d) NR/SBR-HV

Die termiese analise bied 'n ondubbelsinnige roete om te voorspel of 'n mengsel mengbaar of onmengbaar is. Die algemene metode wat gebruik word om die glasooorgangstemperatuur (T_g) van polimeermengsels te karakteriseer, is die DSC. Die glasooorgangstemperatuur kan gebruik word om die mengbaarheid van polimeermengsels te evalueer. Onmengbare mengsels registreer dikwels 'n tweefase van T_g , terwyl die mengbare polimeermengsels 'n enkel fase op die DSC-termografieke vertoon. Salgueiro²⁶ het die mengsels van SBR/NR bestudeer deur van positronvernietigingsleefyd-spektroskopie (PVLs-) en die DSC-tegniek gebruik te maak. Die skrywers het gevind dat vir suiwer elastomere (natuurlike rubber en stireen-butadiëenrubber) slegs een T_g elk waargeneem is. Verder is daar in die SBR/NR-mengsels twee T_g 's getoon, wat bewys dat SBR/NR-mengsel 'n onmengbare mengsel is, en dat 'n mengmiddel 'n noodsaaklike vereiste is om die verenigbaarheid van die twee soorte rubber te verbeter.

Tabel 1: Glasooorgangstemperatuur (T_g 's) vir suiwer NR, suiwer SBR en die SBR/NR-mengsel (Pichayakorn, et al., 2013)

	Verbinding		
	A	B	C
SBR	0	50	100
NR	100	50	0
T_g [K] (DSC)	213,1	214,5/226,4	229,6

Ten slotte

Termiese analise is 'n goeie maatstaf van die mengbaarheid van polimeermengsels. AKS is een van die tegnieke wat tussen die ander tegnieke uitstaan as een van die beste, aangesien dit die verstaanbare resultate van die mate van mengbaarheid van polimeermengsels in detail uiteensit. Die lateksmengeltniek is 'n uitstekende tegniek wat gebruik kan word om grafeen te inkorporeer, vergeleke met droë vermenging. Verder moet die lateksmengeltniek gebruik word om produkte of samestellings in nywerhede te vervaardig. Die kombinasie van NR/SBR/GE toon potensiaal vir die resulterende produk om aangewend te word in draagbare toestelle en sensitiewe spanningsensors, hoewel meer navorsing steeds nodig is oor die modifisering van hierdie mengsels.

Datums

Ontvang: 05/04/2022
 Aanvaar: 05/09/2022
 Gepubliseer: 17/10/2022

Bronnelys

Cook, S., 2021, Improving the low temperature resistance of natural rubber, *Journal of Rubber Research* 69-81.
 Coran, A.Y., 2003, Chemistry of the vulcanization and protection of elastomers: A review of the achievements, *Journal of Applied Polymer Science* 87(1), 24-30. <https://doi.org/10.1002/app.11659>.
 Cornish, K., 2014, Biosynthesis of natural rubber (NR) in different rubber-producing species, *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber* 3-29. <https://doi.org/10.1533/9780857096913.1.3>.
 Dong, H., Luo, Y., Zhong, B., et al., 2020, Effects of vulcanization accelerator functionalized graphene on the co-vulcanization kinetics and mechanical strength of NR/SBR blends, *Polymer Testing* 81, 106169. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106169>.

Ferreira, M., Mendonça, R.J., Coutinho-Netto, J., et al., 2009, Angiogenic properties of natural rubber latex biomembranes and the serum fraction of Hevea brasiliensis, *Brazilian Journal of Physics* 39(3), 564-9. <https://doi.org/10.1590/S0103-9732009000500010>.
 Ikeda, Y., 2014, Understanding network control by vulcanization for sulfur cross-linked natural rubber (NR), *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber* 119-134. <https://doi.org/10.1533/9780857096913.1.119>.
 Jeon, I.H., Kim, H., Kim, S.G., 2003, Characterization of rubber micro-morphology by atomic force microscopy (AFM), *Rubber Chemistry and Technology* 76(1), 1. <https://doi.org/10.5254/1.3547733>.
 Jose, L., Joseph, R., 2005, Latex stage blending of natural rubber and poly (vinyl chloride) for improved mechanical properties, *International Journal of Polymeric Materials* 54(5), 387-96. <https://doi.org/10.1080/00914030590908679>.
 Kaliyathan, A.V., Varghese, K.M., Nair, A.S., et al., 2020, Rubber-rubber blends: A critical review, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 36(3), 196-242. <https://doi.org/10.1177/1477760619895002>.
 Kang, H., Tang, Y., Yao, L., et al., 2017, Fabrication of graphene/natural rubber nanocomposites with high dynamic properties through convenient mechanical mixing, *Composites Part B: Engineering* 112, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.035>.
 Klat, D., Karimi-Varzaneh, H.A., Lacayo-Pineda, J., 2018, Phase morphology of NR/SBR blends: effect of curing temperature and curing time, *Polymers* 10(5), 510. <https://doi.org/10.3390/polym10050510>.
 Lim, L.P., Juan, J.C., Huang, N.M., et al., 2019, Enhanced tensile strength and thermal conductivity of natural rubber graphene composite properties via rubber-graphene interaction, *Materials Science and Engineering: B* 246, 112-9. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.06.004>.
 Linares, E., Rippel, M.M., Da Silva, L.L., et al., 2010, Latex blends: overcoming compatibility limitations by electrostatic adhesion, *XII International Macromolecular Colloquium, 7th International Symposium on Natural Polymers and Composites*.
 Mansilla, M.A., Valentín, J.L., López-Manchado, M.A., et al., 2016, Effect of entanglements in the microstructure of cured NR/SBR blends prepared by solution and mixing in a two-roll mill, *European Polymer Journal* 81, 365-75. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.06.023>.
 Mohamed, R.M., 2005, Properties of rubber blends based on natural rubber loaded with different fillers and cured by gamma radiation, *Master Thesis, Ain Shams University (Egypt)*.
 Mason, H., 2020, Graphene 101: Forms, properties and applications. *CompositesWorld [online]*, Available from: <https://www.compositesworld.com/articles/graphene-101-forms-properties-and-applications#:~:text=Forms%20of%20graphene&text=Graphene%20is%20typically%20categorized%20as,can%20consist%20of%20multiple%20layers>. Accessed 26 June 2021.
 Matos, C.F., Galembeck, F., Zarbin, A.J., 2014, Multifunctional and environmentally friendly nanocomposites between natural rubber and graphene or graphene oxide, *Carbon* 78, 469-79. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.028>.
 Papageorgiou, D.G., Kinloch, I.A., Young, R.J., 2017, Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites, *Progress in Materials Science* 90, 75-127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>.
 Pichayakorn, W., Suksaeree, J., Boonme, P., 2013, NR Blends and IPNs: Miscibility and Immiscibility, *Natural Rubber Materials* 177-94. <https://doi.org/10.1039/9781849737647-00177>.
 Puskas, J.E., Chiang, K., Barkakaty, B., 2014, Natural rubber (NR) biosynthesis: perspectives from polymer chemistry, *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber* 30-67. <https://doi.org/10.1533/9780857096913.1.30>.
 Salgueiro, W., Somoza, A., Consolati, G., et al., 2007, A PALS and DSC study on SBR/NR blends, *Physica Status Solidi C* 4(10), 3771-5. <https://doi.org/10.1002/pssc.200675784>.
 Shang, S., Gan, L., Mei, C., et al., 2019, Wet functionalization of graphene and its applications in rubber composites, *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposite* 285-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813248-7.00010-9>.
 Sohail, M., Xue, H., Jiao, Q., et al., 2017, Synthesis of well-dispersed TiO₂@ reduced graphene oxide (rGO) nanocomposites and their photocatalytic properties, *Materials Research Bulletin* 90, 125-30. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.02.025>.
 Su, C.Y., Xu, Y., Zhang, W., et al., 2010, Highly efficient restoration of graphitic structure in graphene oxide using alcohol vapors, *ACS Nano* 4(9), 5285-92. <https://doi.org/10.1021/nn101691m>.
 White, J.L., 1998, Fourth in a Series: Pioneers of Polymer Processing Alexander Parkes, *International Polymer Processing* 13(4), 326. <https://doi.org/10.3139/217.980326>.
 Zhang, H., Xing, W., Li, H., et al., 2019, Fundamental researches on graphene/rubber nanocomposites, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2(1), 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.iaiepr.2019.01.001>.