

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## **Si-PS və Si-PVX POLİMER NANOKOMPOZİTLƏRİN QURULUŞU VƏ FİZİKİ XASSƏLƏRİ**

İxtisas: 2206.01 – Molekulyar fizika

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Əfsanə Ehtibar qızı Surxaylı**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün  
təqdim edilmiş dissertasiyanın

### **AVTOREFERATI**

**Bakı – 2025**

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Fizika fakültəsinin Optika və molekulyar fizika və Nanomaterialların kimyəvi fizikası kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər: fizika elmləri doktoru, dosent  
**Bəxtiyar Gülmalı oğlu Paşayev**

fizika üzrə fəlsəfə doktoru  
**Həbibə Aslan qızı Şirinova**

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın müxbir üzvü,  
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Oqtay Kazım oğlu Qasimov**

fizika elmləri doktoru, professor  
**Müsavər Abdulsalam oğlu Musayev**

fizika elmləri doktoru, dosent  
**Gülşən Ələkbər qızı Ağayeva**



Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

fizika elmləri doktoru, dosent  
**Hüseyin Mikayıl oğlu Məmmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

fizika üzrə fəlsəfə doktoru  
**Səhla Nəbi qızı Hacıyeva**

Elmi seminarın sədri:

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor  
**Niftan Mehralı oğlu Qocayev**



## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Nanotexnologiyanın sürətli inkişafı ilə əlaqədar olaraq yüksək funksional göstəricilərə malik yeni polimer nanokompozitlərin alınması molekulyar fizikanın və materialşünaslığın prioritet istiqamətlərindən biri hesab edilir. Polimer əsaslı nanokompozitlər, xüsusilə də qeyri-üzvi nanohissəciklərlə modifikasiya olunmuş strukturlar, bir sıra üstünlüklərinə (yüksək mexaniki möhkəmlik, istiliyə davamlılıq, optik şəffaflıq, tənzimlənən keçiricilik və s.) görə çoxsaylı tətbiq imkanlarına malikdir. Sənayedə geniş yayılmış termoplastik polimerlər stabil kimyəvi quruluşları və əlverişli texnoloji emal imkanları səbəbindən əsas materiallar kimi seçilir. Onların müxtəlif funksional nanohissəciklərlə modifikasiyası nəticəsində alınan kompozit strukturlar yeni fiziki xassələrə malik olur və çoxkomponentli sistemlərin öyrənilməsi baxımından maraqlı tədqiqat obyektinə çevrilir.<sup>1</sup>

Nanohissəciklərlə modifikasiya olunmuş polimer matrislərin quruluş-funksiya əlaqələrinin öyrənilməsi xüsusilə vacibdir, çünki, bu hissəciklər həm kvantölçülü effektlər, həm də səth aktivliyi baxımından mühüm rol oynayır. Belə sistemlərdə müxtəlif qarşılıqlı təsirlərin yaranması nəticəsində struktur dəyişikliklərinin baş verməsi onların molekulyar xüsusiyyətlərinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Bu səbəbdən, nanokompozitlərin morfoloji, struktur, spektroskopik, istilik və optik xassələrinin kompleks şəkildə öyrənilməsi və bu xassələrin nanohissəciklərin konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişməsinin təhlili olduqca zəruridir. Müxtəlif metodlar vasitəsilə nanokompozitlərin strukturunda baş verən dəyişiklikləri, o cümlədən faza keçidlərini aşkar etmək mümkündür. Molekulyar fizikada bu cür çoxkomponentli sistemlərin tədqiqi, maddənin mikrosəviyyəli strukturu ilə makroskopik xüsusiyyətləri arasındakı əlaqənin aydınlaşdırılması olduqca mühümdür.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Kurien, R.A. A comprehensive review on the mechanical, physical, and thermal properties of abaca fibre for their introduction into structural polymer composites / R.A.Kurien, D.P.Selvaraj, M.Sekar [et al.] // Cellulose, – 2023. Aug.; v. 30, № 14, – p. 8643-8664.

<sup>2</sup>Guedri, A. Synthesis, characterization, structural, and optical properties of polyvinyl Chloride/Zinc oxide nanocomposite films for photocatalysis application / A.Guedri, M.Zaabat, B.Boudine [et al.] // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, – 2020. May; v. 30, № 12, – p. 4884-4894.

Son on ildə sənayenin bir çox sahələrində nanohissəciklərlə modifikasiya olunmuş polimerlərin istifadəsi geniş vüsət almışdır. Praktiki əhəmiyyətə və sənaye yönümlü tətbiqlərə malik polimerlər arasında polistirol (PS) və polivinilxlorid (PVX) xüsusi yer tutur. Hər iki polimer kimyəvi və mexaniki baxımdan yüksək davamlı, istehsal texnologiyası baxımından sadə və iqtisadi sərfəli, emal prosesi baxımından isə asan olduğuna görə müxtəlif sənaye sahələrində – tikinti sənayesində, avtomobil sənayesində, elektrotexnikada, tibbdə və s. geniş istifadə edilir. Həmçinin, silisium (Si) nanohissəcikləri də universal yarımkeçirici xüsusiyyətlərə (qadağan olunmuş enerji zonasının optimal enə, yüksək ərimə temperaturuna, səthində yaxşı oksid təbəqəsi əmələ gətirmə qabiliyyətinə və s. malik olması) malik olduqları üçün elektronika, fotonika, sensor texnologiyaları, biotibb və enerji daşıyıcı sistemlərdə geniş tətbiq olunur. Bu baxımdan, Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı nanokompozit materiallar həm fundamental elmi araşdırmalar, həm də sənaye yönümlü tətbiqlər üçün aktual tədqiqat obyektidir.<sup>3</sup>

Qeyd edək ki, polimer əsaslı nanokompozit sistemlərin fiziki və fiziki-kimyəvi xassələrinin tədqiqi, belə sistemlərdə yaranan struktur və qarşılıqlı təsir proseslərinin molekulyar mexanizminin öyrənilməsi molekulyar fizikada, fiziki kimyada, nanotexnologiyada, materialşünaslıqda böyük əhəmiyyət kəsb edir. Nanohissəcik-polimer sistemlərinin bütün fiziki və fiziki-kimyəvi xassələri sistemin komponentlərinin molekulları (atomları) arasında yaranan qarşılıqlı təsirlərlə müəyyən olunur və bu xassələrin dəyişmə mexanizmini izah etmək çox çətinidir. Bu sahədə kifayət qədər araşdırmalar olsa da, yeni tədqiqatların aparılmasına ehtiyac böyükdür. PS və PVX polimerləri uzun illərdir intensiv tədqiq olunur. Lakin, bu istiqamətdə müəyyən boşluqlar və çatışmazlıqlar da mövcuddur. Ədəbiyyatda həm PS, həm də PVX polimer matrisi əsasında yaranan nanokompozitlərin müqayisəli tədqiqi ilə bağlı işlərə çox az rast gəlinir. Elmi ədəbiyyatın təhlili göstərir ki, müasir və informativ metodlarla məqsədyönlü, sistemli və kompleks şəkildə belə tədqiqatların aparılmasına ehtiyac var. Təqdim

---

<sup>3</sup>De Souza Neto FN, Ferreira GR, Sequinel T, et al. Polymeric nanocomposites for automotive application. Amsterdam: Elsevier eBooks, 2023, pp. 473–506. DOI: 10.1016/b978-0-323-91611-0.00009-8.

olunan dissertasiya işi, Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı polimer nanokompozit materialların quruluşu və fiziki xassələrinin tədqiqi kimi aktual problemə həsr olunub.

**Tədqiqatın obyektı və predmeti.** Tədqiqatın obyektı olaraq müxtəlif konsentrasiyalı ( $C'_{Si} = 1.5\%$ ,  $C''_{Si} = 3\%$ ) Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı polimer nanokompozit materiallar götürülmüşdür. Tədqiqatın predmeti isə tədqiq olunan nanokompozit materialların morfoloji, struktur, spektroskopik, istilik və optik xüsusiyyətlərinin molekulyar fizika baxımından təhlilidir.

**Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri.** Dissertasiya işinin məqsədi Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı polimer nanokompozit materialların alınması, bir sıra xarici amillərin bu nanokompozitlərin quruluşuna və xassələrinə təsirinin molekulyar mexanizmlərinin və uyğun xassələrin məqsədyönlü dəyişdirilməsi ilə tətbiq imkanlarının müəyyənləşdirilməsidir.

Bu məqsədə nail olmaq üçün dissertasiya işinin qarşısında aşağıdakı məsələlər qoyulmuş və həll edilmişdir:

–Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı yeni polimer nanokompozitlərin alınması üçün texnologiyanın işlənilib hazırlanması və optimal texnoloji şəraitin müəyyən edilməsi;

–Alınmış nanokompozitlərin daxili quruluşunun, səth morfolojiyasının və nanohissəciklərin polimerdə dispersiya dərəcəsinin skanedic elektron mikroskopiya (SEM) və keçirici elektron mikroskopiya (KEM) metodları ilə kristallik quruluşunun, faza tərkibinin və kristallit ölçülərinin isə rentgen difraksiya (RD) metodu ilə tədqiqi;

–Nanokompozitlərin molekulyar quruluşunun və struktur xüsusiyyətlərinin infraqırmızı (İQ) və Raman spektroskopiya metodları ilə tədqiqi;

–İstilik və termodinamik xassələrinin termoqravimetrik analiz (TQA), diferensial termik analiz (DTA), diferensial skanedic kalorimetriya (DSK) metodları ilə tədqiqi;

–Termik destruksiyasının kinetik və termodinamik xarakteristikalarının təyini;

–Optik xassələrinin spektroskopik ellipsometriya metodu ilə tədqiqi.

**Tədqiqat metodları.** Dissertasiya işində tədqiqat metodları olaraq

skanedici elektron mikroskopiya (SEM), keçirici elektron mikroskopiya (KEM), rentgen difraksiya (RD), infraqırmızı spektroskopiya (İQ), Raman spektroskopiya, termoqravimetrik analiz (TQA), diferensial termik analiz (DTA), diferensial skanedici kalorimetriya (DSK) və spektroskopik ellipsometriya metodlarından istifadə edilmişdir. Bu eksperimental tədqiqat metodları vasitəsilə tədqiq olunan nümunələrin morfoloji, struktur, spektroskopik, istilik və optik xüsusiyyətləri kompleks şəkildə araşdırılmışdır.

### **Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar.**

1. Si nanohissəciklərinin PS və PVX polimer matrisinə daxil edilməsi nəticəsində polimer zəncirinin çəvikliyinə dəyişməsi.
2. Si nanohissəciklərinin konsentrasiyasından asılı olaraq Si-PS və Si-PVX polimer nanokompozitlərinin termal davamlılığının, termik destruksiya sürətinin və şüşələşmə temperaturunun dəyişməsi.
3. Si nanohissəciklərinin konsentrasiyasından asılı olaraq Si-PS və Si-PVX polimer nanokompozitlərinin strukturunun öyrənilməsi.
4. Si nanohissəciklərinin konsentrasiyasından asılı olaraq Si-PS və Si-PVX nanokompozitlərinin sındırma və sönmə əmsalının dəyişməsi.
5. Si-PS və Si-PVX nanokompozitlərinin sındırma əmsalının kristallaşmanın temperatur-zaman rejimindən asılılığının müəyyənləşdirilməsi.

### **Tədqiqatın elmi yeniliyi.** Tədqiqat işində ilk dəfə olaraq:

1. SEM, KEM və RD metodlarının nəticələrinə əsasən, Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı polimer nanokompozitlərin daxili quruluşu, səth morfoloqiyası, dispersiya dərəcəsi, kristallik quruluşu, faza tərkibi və kristallit ölçüləri müəyyən edilmişdir.
2. İQ və Raman spektroskopiya metodlarının nəticələrinə əsasən, nanokompozitlərin molekulyar quruluşu və struktur xüsusiyyətləri öyrənilmişdir.
3. TQA, DTA və DSK metodlarının nəticələrinə əsasən, nanokompozitlərin istilik və termodinamik xassələri kompleks şəkildə təhlil edilmişdir.
4. TQA eksperimental metodunun nəticələrinə Coats-Redfern üsulunun tətbiqi ilə alınmış nanokompozitlərin istilik destruksiyasının kinetik və termodinamik xarakteristikaları (çevrilmə dərəcəsi, aktivləşmə enerjisi, aktivləşmə Gibbs enerjisi, aktivləşmə entalpiyası və

aktivləşmə entropiyası) təyin edilmişdir.

5. Spektroskopik ellipsometriya metodunun nəticələrinə əsasən, nanokompozitlərin optik xassələri (sındırma və sönmə əmsalları) sistemli şəkildə təhlil edilmişdir.

**Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti.** Polimer əsaslı nanokompozit materialların alınması, onların quruluşunun və fiziki xassələrinin tədqiqi, belə sistemlərdə eksperimental nəticələrin əldə edilməsi, polimer makromolekullarının konformasiyalarının müəyyən edilməsi, ölçülərinin qiymətləndirilməsi perspektivli (ucuz başa gələn, ekoloji cəhətdən təhlükəsiz və istifadəyə uzunmüddətli yararlı olan və s.) yeni materialların axtarışı üçün son dərəcədə vacibdir və belə materiallar elektronika, optoelektronika, sensorlar, qoruyucu örtüklər və biotibb sahələrində praktiki tətbiqlər üçün yeni imkanlar açır. Buna görə də təqdim olunan dissertasiya işində aparılmış tədqiqatlar molekulyar fizika və nanofizika baxımdan həm nəzəri, həm də müəyyən praktiki əhəmiyyətə malikdir.

**Aprobasiyası və tətbiqi.** Dissertasiya işinin əsas müddəaları və nəticələri aşağıdakı konfranslarda müzakirə olunmuş və onların materiallarında dərc edilmişdir: 1) Fizika və astronomiyanın müasir problemləri, 2022, Bakı Dövlət Universiteti, Bakı; 2) 8<sup>th</sup> International Conference, Modern Trends In Physics, November 30 – December 01, 2023, Bakı State University, Bakı; 3) 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference, Modern Directions and Movements in Science, 26-28 October, 2023, №176, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg; 4) Fizika və astronomiyanın müasir problemləri, 2024, Bakı Dövlət Universiteti, Bakı; 5) 5<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference “Science And Education in Progress” Dublin, Ireland, March 26-28, 2025.

Dissertasiya işinin materialları 6 məqalə (onlardan 3-ü Web of Science və Scopus bazasında indekslənən jurnallarda, digər 3-ü isə Respublika jurnallarında), 4 konfrans materialı (1 beynəlxalq və 3 Respublika) və 2 tezis (beynəlxalq) şəklində yerli və xarici jurnallarda dərc edilmişdir.

**Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.** Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Optika və molekulyar fizika və Nanomaterialların kimyəvi fizikası kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

**Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd**

**olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi.** Dissertasiya işi bütövlükdə 152 səhifədə yerləşdirilib. O, 58 şəkil, 9 cədvəl daxil olmaqla, girişdən, 4 fəsildən, nəticədən, istifadə edilmiş 195 adda ədəbiyyat siyahısından, ixtisarların və şərti işarələrin siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın işarə ilə götürülmüş ümumi həcmi (mətnəki boşluqlar, şəkillər, cədvəllər, qrafiklər və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – 182 920 simvol (o cümlədən, Giriş – 13 258 simvol, I fəsil – 50 887 simvol, II fəsil – 32 677 simvol, III fəsil – 54 958 simvol, IV fəsil – 29 293 simvol, Nəticə – 1 847 simvol) təşkil edir.

## İŞİN MƏZMUNU

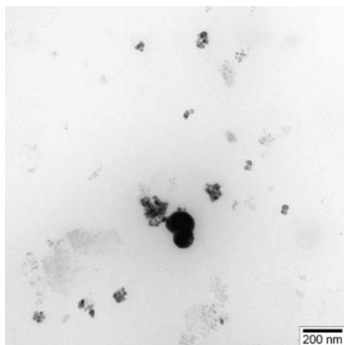
**Girişdə** mövzunun aktuallığı izah edilmiş, işin məqsədi və elmi yeniliyi müəyyənləşdirilmiş, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar şərh olunmuş, aparılan tədqiqatdan alınan nəticələrin müzakirə olunduğu yerli və beynəlxalq konfranslar haqqında məlumat verilmiş və dissertasiyanın elmi-praktiki əhəmiyyəti göstərilərək fəsillərinin qısa məzmunu təqdim edilmişdir.

**Birinci fəsil** xülasə xarakterlidir, Si-PS və Si-PVX kompozit sistemlərinin mikroskopik, spektroskopik, optik, mexaniki və istilik xassələrinə aid görülmüş işlərin qısa icmalından ibarətdir.

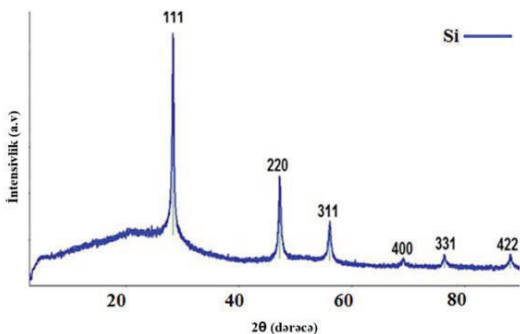
**İkinci fəsil** qeyri-üzvi nanodoldurucu və üzvi polimer əsaslı nanokompozitlərin alınma texnologiyası və tədqiqat üsullarının şərhinə həsr edilmişdir. Bu fəsildə tədqiqat obyektlərinin seçilməsi və alınması texnologiyası, polimer nanokompozitlərin molekulyar quruluşunun müxtəlif eksperimental tədqiqat metodları (Elektron mikroskopiyası (SEM və KEM), Rentgen difraktoqramması, İnfraqırmızı və Raman spektroskopiyası, Sinxron termiki analiz (TQA, DTA və DSK) və spektroskopik ellipsometriya) ilə tədqiqi, həmçinin, termik destruksiyanın kinetik və termodinamik xarakteristikalarının təyini ətraflı şərh olunmuşdur.

**Üçüncü fəsildə** Si-PS kompozit sisteminin doldurucunun konsentrasiyasından və kristallaşmanın temperatur-zaman (KTZ) rejimindən asılı olaraq strukturu, fazalararası qarşılıqlı təsirləri, optik və istilik-fiziki xüsusiyyətləri, kinetik və termodinamik parametrləri sistemli şəkildə öyrənilmişdir. EDS (SEM) analizi Si nanohissəciklərinin yüksək

kimyəvi təmizliyə malik olmasını təsdiqləmişdir. KEM təsvirləri isə onların ölçüsü və morfologiyası haqqında məlumat vermişdir. Məlum olmuşdur ki, Si nanohissəciklərinin ən kiçik ölçüləri 10–20 nm aralığında dəyişir (şəkil 1a). RD analizi isə hissəciklərin polikristallik quruluşa malik olduğunu təsdiqləmişdir.  $2\theta$  bucaqlarında 28.40, 47.20, 56.05, 69.10 və 76.30°-də müşahidə olunan difraksiya pikləri müvafiq olaraq [111], [220], [311], [400], [331] və [422] Miller indekslərinə uyğun gəlir və bu, quruluşun almaz tipli kristal qəfəsə malik olduğunu göstərir (şəkil 1b).



a)



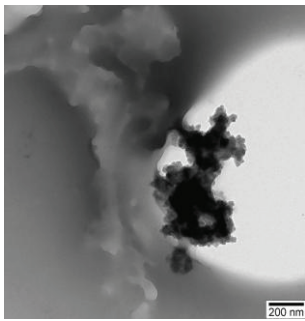
b)

**Şəkil 1.** Təmiz Si nanohissəciyinin KEM (a) və RD (b) təsvirləri

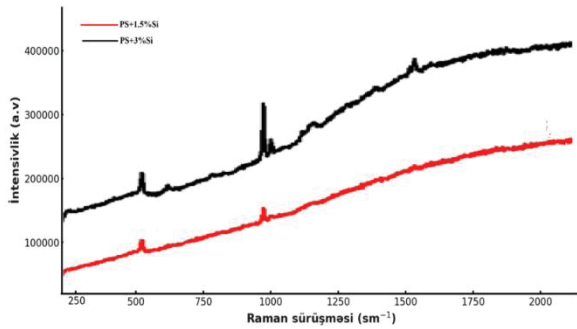
Si nanohissəciklərinin daxil edilməsi ilə PS-in morfologiyasında baş verən dəyişikliklər də SEM və KEM metodları ilə öyrənilmişdir. Şəkil 2a-da Si-PS kompozit sisteminin KEM təsvirləri PS və Si arasında fazalararası qarşılıqlı təsirin olduğunu və polimer-doldurucu sərhədlərinin aydın seçilməsi ilə fiziki kontaktın mövcudluğunu göstərmişdir.

Şəkil 2b-də Si-PS nanokompozit sisteminin silisiumun iki fərqli konsentrasiyasında ( $C'_{Si} = 1.5\%$ ,  $C''_{Si} = 3\%$ ) Raman spektrləri verilmişdir. Məlumdur ki, spektroskopik metodlar nanokompozit sistemlərin molekulyar quruluşu, kimyəvi rabitələri və fazalararası qarşılıqlı təsir xüsusiyyətlərini təyin etməyə imkan verir. Raman spektroskopiyası ilə 250–2000  $\text{sm}^{-1}$  diapazonunda aparılmış analizlər nəticəsində də Si-PS sisteminin molekulyar quruluş xüsusiyyətləri və fazalararası qarşılıqlı təsirləri öyrənilmişdir. Si–Si rabitəsinin valent rəqs-

lərinə məxsus udulma xətti  $520 \text{ sm}^{-1}$ -də müşahidə olunmuşdur. Məlumdur ki, polistirolun quruluşu əsas zəncirdən və fenil yan qruplarından ibarətdir. Məhz, fenil halqasının malik olduğu  $\pi$ -elektronları Raman spektrində güclü siqnalların yaranmasına səbəb olur. Si konsentrasiyasının 1.5%-dən 3%-ə artması ilə  $520$  və  $1001 \text{ sm}^{-1}$  xətləri ilə yanaşı  $1150 \text{ sm}^{-1}$  (C–H uzanma) və  $1500 \text{ sm}^{-1}$  ( $\text{CH}_2$  əyilmə) pikləri də qeydə alınmışdır. Bu yeni piklərin yaranması nanohissəcik–polimer qarşılıqlı təsirini təsdiq edir. Ehtimal olunur ki, bu yeni piklərin əmələ gəlməsinin səbəbi Si nanohissəciklərinin səthində mövcud olan silan qruplarının daimi dipol kimi çıxış etməsi hesabına polistirol polimerində yaranan induksiya olunmuş dipollardır.



a)



b)

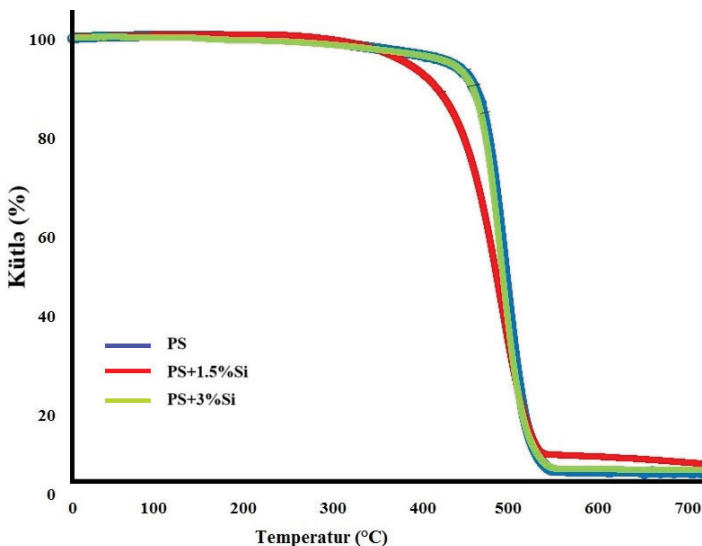
**Şəkil 2.** Si-PS kompozit sisteminin KEM (a) və Raman təsvirləri (b)

Bununla yanaşı, bu fəsilə Si-PS kompozit sisteminin quruluşu İQ və RD metodları ilə də öyrənilmişdir. RD analizi göstərmişdir ki, amorf polistirola polikristallik Si əlavə edildikdə PS öz amorf quruluşunu saxlayır.

İQ oblastda aparılan ölçmələr hesabına  $694$ ,  $835$ ,  $905$  və  $1026 \text{ sm}^{-1}$  oblastında müşahidə olunan və Si səthindəki silan qrupları ilə bağlı olan piklər qeydə alınmışdır. Si nanohissəciklərinin polimer matrisi ilə yalnız fiziki qarşılıqlı təsirdə olduğu təsdiqlənmişdir. Polistirol matrisinə aid əsas udulma xətləri  $3022$ ,  $2919$ ,  $2850$ ,  $1602$ ,  $1490$ ,  $1450$  və  $1147 \text{ sm}^{-1}$  oblastlarında qeydə alınmışdır ki, bunlar aromatik C–H,  $\text{CH}_2$  qruplarının vibrasiyaları və C=C rabitələrinin rəqslərinə uyğundur. Polistirol matrisində Si konsentrasiyasının artması ilə İQ spek-

trində qeydə alınan udulma zolaqlarının mövqeyi, forması və intensivliyində müşahidə olunan dəyişikliklər, polimerin ataktik stereokimyəvi quruluşu və amorf təbiətinin yaratdığı konformasiya müxtəliflikləri ilə əlaqələndirilir.

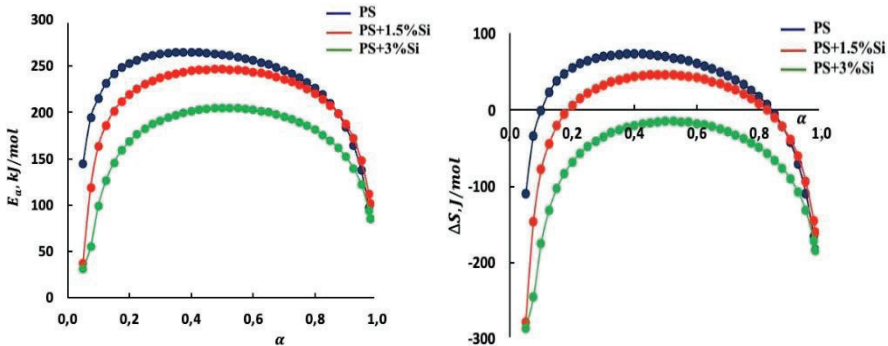
Si-PS nanokompozitinin konsentrasiyadan asılı istilik xassələri Sinxron termiki analiz (TQA, DTA və DSK) vasitəsilə tədqiq edilmişdir. Şəkil 3-də təsvir olunmuş təmiz PS və Si-PS nanokompoziti üçün kütlənin temperaturdan asılılıq əyriləri göstərir ki, polistirol kütləsinin 50%-ni 434.31°C-də, tam kütləsini isə 462.5°C-də itirir. Si-PS nanokompozitində isə destruksiya temperaturları nanohissəcik konsentrasiyasından asılı olaraq artır. Si(1.5%)-PS üçün  $T_{50\%}$  və  $T_{son\%}$  uyğun olaraq 435.18 və 442.12°C-də, Si(3%)-PS üçün isə 438.47 və 481.85°C-də müşahidə olunmuşdur. Bu artım, Si nanohissəciklərinin polimer matrisində diffuziya baryeri yaratması, istiliyi homogen paylaşması və pirolitik məhsulların çıxışını məhdudlaşdırması nəticəsində parçalanma prosesini ləngitməsi ilə izah olunur. DTA analizi də Si-un əlavə olunması ilə PS-in destruksiyasının ləngidiyini təsdiqləyir. Belə



Şəkil 3. Təmiz PS və Si-PS kompozit sisteminin TQA əyrisi

ki, təmiz PS-in istilik deqradasiyasının baş verdiyi maksimal sürət – 42.460 mq/dəq olduğu halda, 3%Si əlavə olunmuş nümunə üçün bu qiymət -35.099 mq/dəq-dir. Bu azalma nanohissəciklərin zəncir hərəkətliliyini məhdudlaşdıraraq istilik yayılmasını tənzimləməsi və nəticədə materialın termik stabilliyini artırması ilə izah olunur. DSK analizi isə Si-un PS-də konsentrasiyasının artması ilə şüşələşmə temperaturunun yuxarı temperatur oblastına doğru sürüşdüyünü təsdiq etmişdir.<sup>4</sup>

PS və Si-PS kompozit nümunələrinin termik destruksiya kinetikasi Coats-Redfern metodu əsasında araşdırılmış və polimerin kinetik və termodinamik parametrlərinin onun çevrilmə dərəcəsiindən ( $\alpha$ ) asılı olaraq dəyişməsi təhlil edilmişdir. Şəkil 4a-da göstərilən  $E_a(\alpha)$  asılılığından görüldüyü kimi, Si nanohissəciklərinin əlavə edilməsi polistirol ilə müqayisədə qeydə alınan aktivləşmə enerjisinin azalmasına səbəb olmuşdur. Təmiz PS nümunəsində çevrilmə dərəcəsi artdıqca aktivləşmə enerjisində qismən artım müşahidə olunur və bu  $\alpha=0.4$  çevrilmə dərəcəsiində 264.9 kC/mol olmaqla maksimal qiymətə çatır. Daha sonra isə çevrilmə dərəcəsi artsa da aktivləşmə enerjisində azalma qeydə alınır. Polistirolun termik deqradasiyasının vahid aktivləşmə enerjisi ilə getməməsi onu göstərir ki, prosesin müxtəlif mərhələlərində tələb olunan enerji fərqlənir.



**Şəkil 4.** Təmiz PS və Si-PS kompozit sisteminin  $E_a(\alpha)$  (a) və  $\Delta S^\#(\alpha)$  (b) asılılıq əyriləri

<sup>4</sup>Shirinova, H. Preparation, characterization and thermal properties of the PS+Si based polymer nanocomposites / H.Shirinova, A.Surkhayli, B.Pashayev [et al.] // Journal of Thermoplastic Composite Materials, – 2025. Sep.; v. 38, № 5, – p. 1785-1798.

Si nanohissəciklərinin daxil edilməsi ilə bütün çevrilmə dərəcələrində aktivləşmə enerjisinin qiymətində azalma müşahidə olunur. TQA metodunun nəticələri göstərir ki, Si nanohissəciklərini polistrola daxil etdikdə nanokompozitin termik davamlılığı artır. Buna baxmayaraq, aktivləşmə enerjisinin azalması mikrokinetik baryerlərin azalması ilə əlaqədar ola bilər. Si nanohissəciklərinin əlavə olunması ilə PS sistemi makroskopik miqyasda daha yüksək termik sabillik qazanmış olsa da, mikroskopik miqyasda Si nanohissəciklərinin səthi polistiro-lun termik deqradasiyası zamanı baş verən sərbəst radikal əmələgəlmə mexanizmini dəyişir.

Si nanohissəcikləri polistiro-la daxil edildikdə, onların səthindəki silan qrupları C–C və C–H rabitələrinin elektron buludunun sıxlığını qismən dəyişərək induksiya effekti yaradır və rabitəni zəiflədir. Təsadüfi deyil ki, Si nanohissəciklərinin təsiri xüsusən inisiya mərhələsində hissə olunur. Belə ki, Si-un əlavə olunması ilə müşahidə olunan əsas dəyişiklik çevrilmə dərəcəsinin kiçik qiymətlərində, yəni prosesin ilkin mərhələsində baş verir ki, bu da məhz deqradasiyanın inisiya mərhələsinə uyğundur. Çevrilmə dərəcəsi artdıqca aktivləşmə enerjiləri arasındakı fərq azalaraq nəticədə sıfıra yaxınlaşır. Beləliklə, Si nanohissəcikləri çevrilmənin əsasən ilkin mərhələsində aktivləşmə enerjisini azaldır. Bunun səbəbi Si-un səthindəki silan qrupları ilə polistiro-l arasındakı induksiya qarşılıqlı təsirdir. Qeyd edək ki, bu nəticə Raman spektroskopiyasından alınmış nəticələrlə uzlaşır.

Aktivləşmə entalpiyasında da eyni tendensiya müşahidə edilmişdir.  $\Delta H^\#$  bütün hallarda müsbət qiymətlər almışdır. Bu o deməkdir ki, istənilən halda proses endotermikdir, lakin Si əlavə olunduqda prosesin getməsi üçün daha az istilik tələb edilir.

Təmiz PS üçün  $\Delta H^\#$ -in maksimum qiyməti 259.09 kC/mol olub  $\alpha=0.40$  olduqda, minimum qiyməti 78.84 kC/mol  $\alpha=0.98$ -də müşahidə edilmişdir. 1.5%Si nanohissəcikləri əlavə edildikdə maksimum entalpiya qiyməti 240.60 kC/mol-a qədər azalmış və çevrilmə dərəcəsi  $\alpha=0.475$ -də qeydə alınmışdır. Minimum  $\Delta H^\#$  qiyməti isə  $\alpha=0.98$ -də 95.27 kC/mol olmuşdur. 3%Si olan sistemdə isə  $\alpha=0.525$ -də  $\Delta H^\#$ -in maksimum qiyməti azalaraq 198.85 kC/mol, minimum qiyməti isə  $\alpha=0.98$ -də 78.97 kC/mol müşahidə edilmişdir. Bu, sistemdə nanohissəciklərin konsentrasiyası artdıqca sistemin nizamlılığının artması və

polimerin zəncir seqmentlərinin hərəkətliliyinin məhdudlaşması ilə izah olunur (şəkil 4b). 1.5%Si olan nümunədə  $\alpha=0.625$ -də  $\Delta G^\#$ -nin minimum qiyməti 207.49 kC/mol,  $\alpha=0.98$ -də isə maksimum qiyməti  $\Delta G^\#= 214.40$  kC/mol müşahidə edilmişdir. Si-un konsentrasiyası 3%-ə çatdıqda  $\Delta G^\#$ -nin minimum qiyməti  $\alpha=0.45$ -də 209.20 kC/mol, maksimum qiyməti isə  $\alpha=0.98$ -də 217.24 kC/mol olmuşdur.

Si-PS kompozit sistemi üçün spektroskopik ellipsometriya vasitəsilə 200-1200 nm diapazonda sındırma (n) və sönmə (k) əmsalları öyrənilmişdir. Təhlillər göstərir ki, Si-PS nanokompozitlərində Si-un miqdarının 1.5%-dən 3%-ə qədər artırılması normal və anomal dispersiya oblastlarında sındırma və sönmə əmsallarında yalnız cüzi artıma səbəb olmuşdur.

Bu fəsilə həmçinin, Si-PS sisteminin quruluşuna müxtəlif KTZ rejimlərinin təsiri araşdırılmışdır. SEM analizi göstərir ki, yavaş soyutma zamanı zəncirlərin termodinamik tarazlığa gəlməsi üçün daha çox vaxt olduğundan daha nizamlı morfologiya müşahidə olunur. Sürətli soyutma ilə alınmış nümunələrdə isə qeyri-bircins strukturlar formalaşır ki, bu da yüksək soyutma sürətinin Si nanohissəciklərinin PS zəncirləri arasında homogen paylanmasına və zəncirlərin nizamlı quruluş formalaşdırmasına mane olması ilə izah olunur. RD analizi də göstərir ki, soyutma sürəti artdıqca sistemin amorf fazasının payı artır. TQA nəticələrinə əsasən, suda və maye azotda soyudulmuş nümunələrin  $T_{50\%}$  qiymətləri olduqca yaxın olub (uyğun olaraq 435.18 və 433.29°C) yavaş rejimdə alınmış nümunələr üçün olan qiymətdən (426.08°C) daha yüksəkdir. DSK nəticələrinə görə maye azotla sürətlə soyudulmuş nümunədə  $T_g$  daha yüksək olmuşdur ki, bu da nanohissəciklərin zəncir hərəkətliliyini məhdudlaşdırması ilə əlaqələndirilmişdir.<sup>5</sup>

Müxtəlif KTZ rejimlərində sintez olunmuş Si-PS kompozitlərinin kinetik və termodinamik parametrlərinin Coats–Redfern metodu ilə təhlili göstərir ki, soyutma sürəti materialın stabilliyinə və strukturlaşma səviyyəsinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Yavaş soyutma rejimində parametrlərin aşağı qiymət alması polimer seqmentləri arasında zəif qarşılıqlı təsirlərlə bağlıdır ki, bu da onların hərəkətliliyini artıraraq

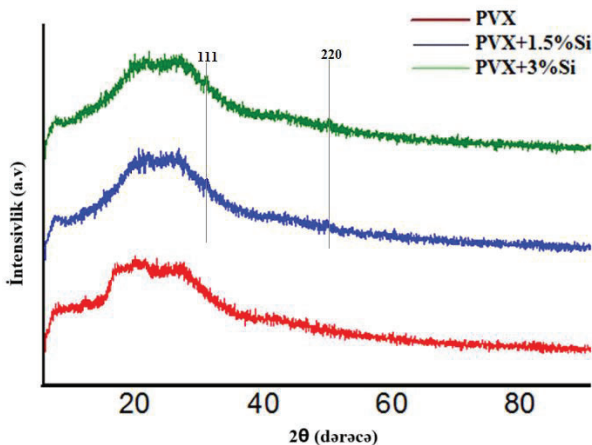
---

<sup>5</sup>Shirinova, H. Optimizing thermal behavior in HIPS/silicon nanocomposites: The role of cooling rates / H.Shirinova, A.Surkhayli, B.Pashayev [et al.] // Journal of Elastomers & Plastics, – 2025. Mar.; –p.1–17.

enerji baryerini azaldır. Bu halda struktur daha az stabildir, lakin molekulların termodinamik tarazlığa çatması üçün kifayət qədər vaxt olduğundan lokal nizamlılıq müəyyən qədər qorunur.

**Dördüncü fəsilə** Si-PVX kompozit sistemin doldurucunun konsentrasiyasından və müxtəlif KTZ rejimindən asılı olaraq termik və optik xüsusiyyətləri, quruluşu və termik destruksiyanın kinetikasi təhlil edilmişdir. Si-PS sisteminə analoji olaraq Si-PVX sisteminin quruluşu bir sıra mikroskopik və spektroskopik metodlar ilə öyrənilmişdir. Si-PVX sistemi üçün SEM analizləri aparılmışdır və məlum olmuşdur ki, Si nanohissəcikləri həm polimer daxilinə nüfuz edir, həm də səthdə aqreqatlar əmələ gətirərək onun morfolojiyasını dəyişir. Bu polimerin qismən kristallik quruluşu və polyar təbiəti ilə əlaqələndirilmişdir.

Si-PVX kompozit sisteminin quruluşu rentgenstruktur analiz metodu ilə təhlil edilmiş və şəkil 5-də alınmış nəticələr göstərilmişdir. RD təhlili PVX-nın təxminən 10% kristallik dərəcəsinə malik olduğunu təsdiqləyir. Si əlavə edildikdə,  $20^\circ$  bucağı ətrafında müşahidə olunan ikili maksimum genişlənir ki, bu da nanohissəciklərin polimerin amorf fazasında yerləşərək quruluş mərkəzləri kimi çıxış etdiyini göstərir.

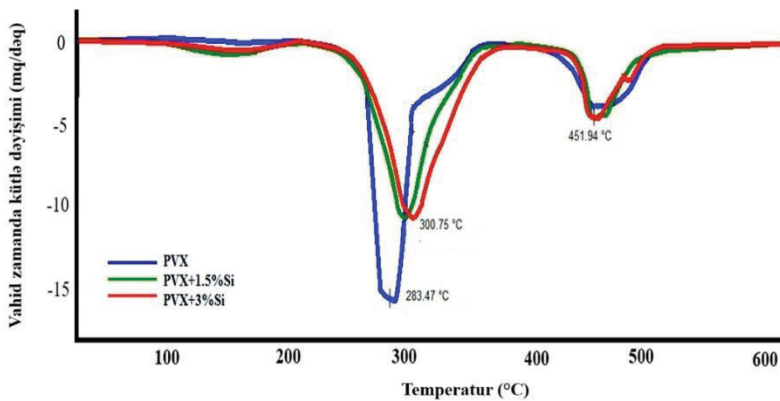


**Şəkil 5.** Təmiz PVX və Si-PVX kompozitinin sisteminin RD spektrləri

Raman spektroskopiyasına əsasən, Si nanohissəciklərinin konsentrasiyası artdıqca  $1100-1600 \text{ cm}^{-1}$  aralığında müşahidə olunan və PVX-



Bununla yanaşı, Si-PVX kompozit sisteminin konsentrasiyadan asılı termik xassələri araşdırılmış, məlum olmuşdur ki, Si nanohissəciklərinin əlavə edilməsi və konsentrasiyanın sonrakı artımı termik stabililiyi artırır. Belə ki, ilkin parçalanma mərhələsində təmiz PVX üçün 50% kütlə itkisinə uyğun temperatur 318.14°C, parçalanmanın son mərhələsi üçün isə 490.45°C-dir. 1.5%Si əlavə olunması  $T_{son\%}$  temperaturunu təxminən 60°C yüksəldərək 547.52°C-ə çatdırmış və bununla da əsas skeletin parçalanmasını ləngidərək, deqradasiyanın daha yüksək temperaturalarda baş verməsinə səbəb olmuşdur. Bu effekt Si hissəciklərinin istiliyi homogen paylaması və sərbəst həcmi azaltması ilə izah olunur. 3%Si konsentrasiyası isə aqreqasiya yaradaraq  $T_{son\%}$ -i 513.39°C-ə qədər azaltmışdır ki, bu da PVX-nın polyar və qismən kristallik quruluşu səbəbindən konsentrasiyanın artması nəticəsində klasterlərin yaranması ilə bağlıdır. DTA nəticələri təsdiqləyir ki, təmiz PVX-da istilik deqradasiyasının baş verdiyi maksimal sürət -15.685 mq/dəq olduğu halda, 1.5 və 3% Si əlavəsi üçün -10.578 və -12.315 mq/dəq olmuşdur (şəkil 7). İkinci mərhələdə isə istilik deqradasiyasının baş verdiyi maksimal temperatur və sürət praktik olaraq eyni (447-451°C və 4-6 mq/dəq) qalmışdır, çünki bu mərhələ daha çox əsas zəncirin parçalanması ilə bağlıdır və Si hissəciklərinin təsiri minimaldır. DSK analizində təmiz PVX üçün şüşələşmə temperaturu 73°C, 3%Si nümunəsi üçün isə 87°C müşahidə olunmuşdur. Bu artım nanohissəciklərin



Şəkil 7. Təmiz PVX və Si-PVX kompozit sisteminin DTA əyriləri

polimer zəncirləri arasında hərəkətliliyi məhdudlaşdırması və struktur sərtliyini artırması ilə izah olunur.<sup>6</sup>

Si-PVX kompozit sistemi üçün aparılmış kinetik təhlillər göstərir ki, təmiz PVX nümunəsində aktivləşmə enerjisi ən yüksək qiymətini çevrilmə dərəcəsi  $\alpha=0.050$ -də alaraq 271.99 kC/mol olmuşdur. Eyni ilə Si-PS sistemində olduğu kimi Si-PVX sistemində də polimerlə müqayisədə nanokompozit üçün hesablanmış aktivləşmə enerjisinin qiymətində azalma qeydə alınır. Bu onu göstərir ki, termik davamlılıq bütün konsentrasiyalarda artsa da, parçalanma aşağı konsentrasiyada kinetik olaraq daha asan baş verir. Xüsusən PVX ilə Si-PVX nanokompozitinin aktivləşmə enerjiləri arasındakı kəskin fərq çevrilmə dərəcəsinin kiçik qiymətlərində müşahidə olunur. Çevrilmə dərəcəsinin  $\alpha=0.6$  qiymətindən sonra fərq tamamilə aradan qalxır. Məlumdur ki, çevrilmə dərəcəsinin kiçik qiymətlərində PVX polimerinin əsas destruksiyası dehidroxlorlaşma ilə bağlıdır. Ehtimal olunur ki, silisium nanohissəciklərinin səthindəki silan qrupları C-Cl rabitəsini qütbləşdirərək HCl ayrılmasını asanlaşdırır və nəticədə də bu mərhələni xarakterizə edən aktivləşmə enerjisinin qiymətində azalma qeydə alınır.

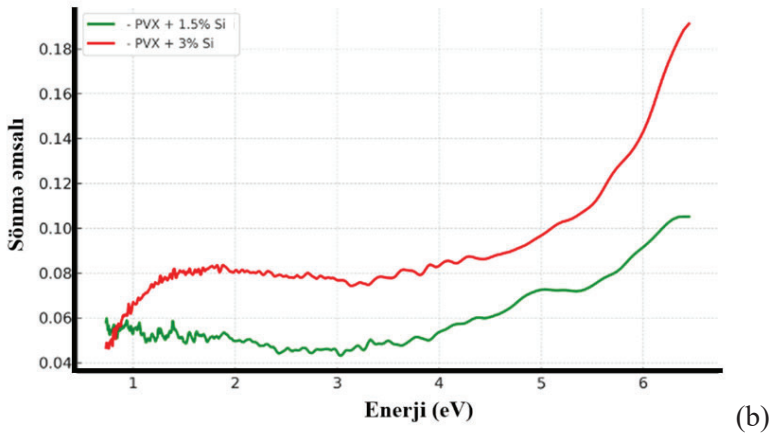
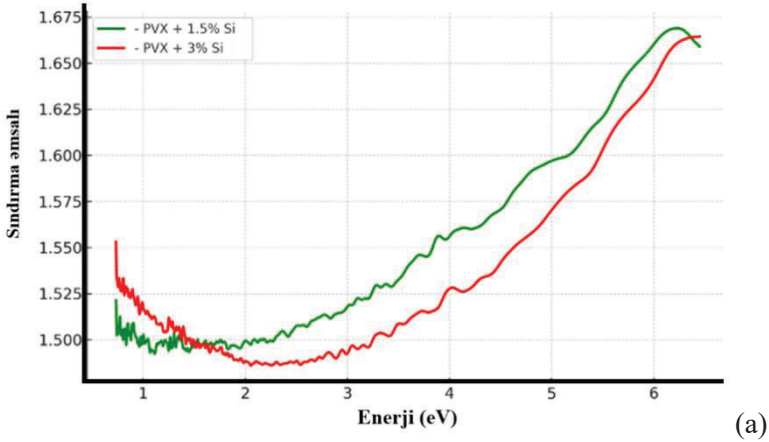
Aktivləşmə entalpiyası da eyni tendensiya göstərmişdir.  $\Delta G^\#$  isə çevrilmə dərəcəsinə asılı olaraq əhəmiyyətli dəyişiklik göstərməmişdir.  $\Delta S^\#$ -in dəyişməsinə baxdıqda isə təmiz PVX-da  $\alpha=0.050$ -də 178.70 C/mol·K yüksək müsbət qiymət müşahidə olunmuş, reaksiya irəlilədikcə kəskin azalaraq  $\alpha=0.700$ -də -358.16 C/mol·K olmuşdur. 1.5 və 3%Si əlavə edilmiş nümunədə  $\Delta S^\#$ -in maksimumu müvafiq olaraq -164.62 və -148.56, minimumu isə -339.58 və -329.02 C/mol·K olmuşdur.

Sındırma əmsalının enerjiden asılılıq əyrilərində, udma zolağının kənarına uyğun enerjilərdə hər iki konsentrasiyada hazırlanmış nanokompozitlər üçün anomal dispersiya müşahidə olunmuşdur. Bu sahədə Si(1.5%)-PVX nanokompozitinin sındırma əmsalı  $n=1.665$ , Si(3%)-PVX nanokompozitinin isə  $n=1.655$  olaraq müəyyən edilmişdir. Si(3%)-PVX nanokompozitində doldurucunun polimerin üstmolekulyar quruluşunda yaratdığı defektlər nəticəsində işığın yayılması homogen optik

---

<sup>6</sup>Shirinova, H.A., Surkhayli, A.E., Pashayev, B.G. Fabrication, characterization and thermal properties of PVC+Si based polymer nanocomposites // Composite Interfaces, – 2025. Feb.; – p. 1-16.

mühitdə deyil, lokal sıxlığı fərqli olan bölgələrdə baş verir ki, bu da effektiv optik sıxlığın azalmasına və nəticədə sındırma əmsalının aşağı düşməsinə səbəb olmuşdur. Sönmə əmsalı isə konsentrasiyanın artması ilə fərqli tendensiya göstərmiş və istər normal, istərsə də anomal dispersiya oblastında artmışdır (şəkil 8). Bütün bu nəticələr Si-PVX kompozit sistemində konsentrasiyanın 3% qiymətində aqreqatlaşmanın güclənməsi, disperslik dərəcəsinin azalması və polimerin üstmolekulyar quruluşunda yaranan defektlərlə izah olunur.

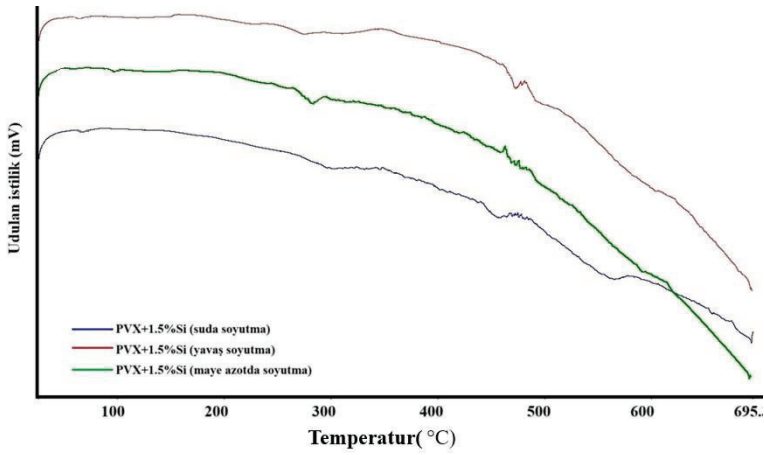


Şəkil 8. Si-PVX kompozit sisteminin sındırma (a) və sönmə əmsalının (b) düşən foton enerjisindən asılılıq əyriləri

KTZ rejimindən asılı olaraq Si-PVX kompozit nümunələr tədqiq edilmişdir. SEM təsvirləri göstərir ki, yavaş soyutma zamanı daha nizamlı və kompakt struktur yaranır. KTZ rejimindən asılı olaraq alınmış Si-PVX kompozit sisteminin quruluşu RD vasitəsilə də öyrənilmişdir. Yavaş soyutma rejimində piklər daha kəskin olmuş, suda və maye azotla soyutmada isə geniş enli difraksiya mənzərəsi müşahidə edilmişdir. Soyutma sürəti artdıqca PVX-nın strukturundakı amorf fazanın payı çoxalır, çünki sərbəst həcm nəzəriyyəsinə məlum olduğu kimi Si nanohissəcikləri zəncirlərarası boşluqları dolduraraq sərbəst həcmi azaldır və molekulyar hərəkətliliyi məhdudlaşdırır. Bu isə yavaş və suda soyutma rejimində zəncir seqmentlərinin kinetik baryerləri aşaraq daha stabil konformasiyalara keçməsinə və zəncirlərin daha nizamlı düzəlməsinə imkan verir.

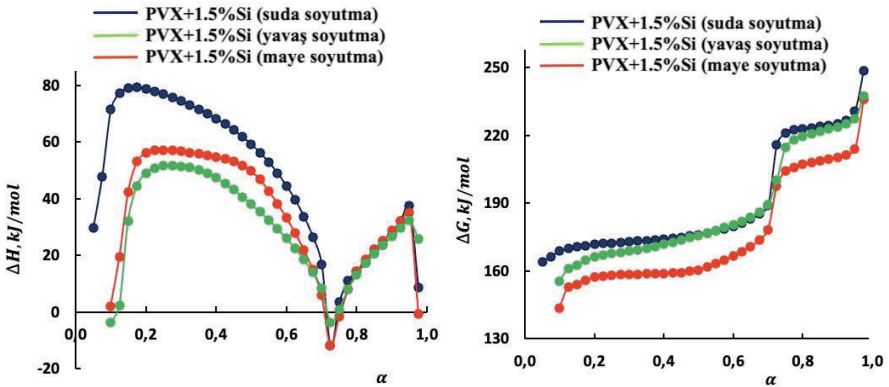
Müxtəlif KTZ rejimindən asılı Si-PVX sisteminin istilik xüsusiyyətləri də araşdırılmışdır. TQA nəticələri göstərir ki, ən yüksək termik sabillik suda soyutma rejimində müşahidə olunmuşdur: 50% kütlə dəyişməsinə uyğun temperatur  $329.3^{\circ}\text{C}$ , destruksiyanın son temperaturu isə  $547.52^{\circ}\text{C}$ -dir. Maye azotla soyutma zamanı müvafiq olaraq  $313.4$  və  $484.85^{\circ}\text{C}$ , yavaş soyutmada isə  $320.5$  və  $481.29^{\circ}\text{C}$  qeydə alınmışdır. DTA analizinə görə, suda soyudulmuş nümunədə istilik deqradasiyasının baş verdiyi maksimal sürət  $-10.578$  mq/dəq, maye azotla soyudulmuş nümunədə maksimal deqradasiya sürəti daha yüksək  $-13.645$  mq/dəq olmuşdur. Bu hal, sürətli soyutma zamanı polimer zəncirlərinin tam relaksasiya edə bilməməsi və ani olaraq stabilləşməsi ilə izah olunur. Yavaş soyutma rejimində isə alınmış nümunənin istilik deqradasiyasının baş verdiyi maksimal sürət  $-7.545$  mq/dəq olmuşdur. İkinci mərhələdə proses daha yavaş ( $-4.5$  mq/dəq) və stabil xarakter daşmışdır.

Müxtəlif KTZ rejimlərində sintez edilmiş Si-PVX kompozit sisteminin  $T_g$  və faza keçid xüsusiyyətləri DSK analizi ilə öyrənilmiş, nəticələr şəkil 9-da göstərilmişdir. Ölçmələr göstərir ki, Si-PVX nanokompozitinin  $T_g$  soyutma rejimindən asılı olaraq nəzərəçarpan dərəcədə fərqlənir. Belə ki, yavaş soyutma rejimində alınmış nanokompozit üçün şüşələmə temperaturu  $83^{\circ}\text{C}$ , suda soyutma rejimində alınmış nümunələr üçün  $85^{\circ}\text{C}$ , maye azotda soyutmaqla alınmış sistem üçün isə  $98^{\circ}\text{C}$  olmuşdur. Si-PVX nanokompozitində də PS əsaslı kompozitlərdə olduğu kimi, ən yüksək  $T_g$  maye azotla soyudulmuş nümunələrdə müşahidə



**Şəkil 9.** Müxtəlif KTZ rejimlərində sintez edilmiş Si-PVX kompozit sisteminin DSK ayrılırları

olunur. Bundan fərqli olaraq, PVX əsaslı nanokompozitlərdə suda və yavaş soyudulmuş nümunələrin şüşələşmə temperaturları bir-birinə çox yaxın qiymət almışdır.  $T_g$  polimerin kimyəvi tərkibi və zəncir quruluşundan asılıdır. PS tamamilə amorf olduğu üçün yavaş və suda soyutma rejimlərində alınmış nümunələrin şüşələşmə temperaturları kəskin fərqlənir, PVX isə qismən kristallik olduğundan, bu fərq daha kiçikdir.



**Şəkil 10.** Müxtəlif KTZ rejimində alınmış Si-PVX kompozit sisteminin  $\Delta H^\#(\alpha)$  və  $\Delta G^\#(\alpha)$  asılılıq ayrılırları

Si-PVX kompozit sisteminin müxtəlif KTZ rejimindən asılı nümunələrinin termik destruksiyası Coats-Redfern metodu ilə araşdırılmış və kinetik parametrləri hesablanmışdır. Ən yüksək aktivləşmə enerjisi suda soyutma rejimində alınmış nümunələr üçün müşahidə olunmuşdur. Bu, polimer zəncirlərinin daha güclü qarşılıqlı təsirə girməsi və molekulyar hərəkətliliyin məhdudlaşması ilə bağlıdır. Bu halda Si hissəcikləri homogen paylanaraq strukturlaşdırıcı rol oynamamış, əsas qarşılıqlı təsirlər polimer seqmentləri arasında yaranmışdır. Yavaş soyutmada alınmış nümunələr üçün isə polimer zəncirləri Si hissəciklərinin ətrafında daha nizamlı yerləşərək lokal kristallik sahələr yaratmış, maye azotla sürətli soyutmada isə amorf və nizamsız quruluş yaranmışdır. Şəkil 10-da Si-PVX kompozit sisteminin  $\Delta G^\#(\alpha)$  və  $\Delta H^\#(\alpha)$  asılılıq əyriləri göstərilmişdir. Qrafikdən də görüldüyü kimi, optimal molekulyar quruluş suda soyutma zamanı formalaşır və bu, həm aktivləşmə enerjisi, həm də entalpiyanın ( $\Delta H^\#$ ) yüksək olması ilə təsdiqlənir.  $\Delta G^\#$  analizinə görə, yavaş soyutmada onun nisbətən aşağı qiyməti sistemin daha az stabilliyini göstərir. Su və maye azotda soyudulan nümunələrdə isə  $\Delta G^\#$  yüksək olub, strukturların daha davamlı olduğunu göstərir. Yavaş soyutma rejimində  $\Delta S^\#$  parametri ən aşağı qiymətə malik olmuşdur, bu isə daxili quruluşun daha nizamlı olmasını göstərmişdir. Əksinə, su və maye azotla soyutmada  $\Delta S^\#$  daha yüksək qiymətə malik olmuşdur. Xüsusilə maye azot rejimində bu, sürətli soyuma səbəbindən mövcud kristal fazanın qismən dağılması ilə izah olunmuşdur.

Spektroskopik ellipsometriya metodunun təhlili göstərir ki, müxtəlif KTZ rejimlərindən asılı olaraq Si-PVX sistemi üçün ən yüksək sındırma əmsalı maye azotla soyudulmuş nümunələrdə müşahidə olunur. Bu hal, PVX-nın molekulyar quruluşu ilə bağlıdır, çünki sürətli soyutma zamanı C–Cl rabitələrinin dipol-dipol qarşılıqlı təsiri güclənir, zəncir seqmentləri elektrostatik cazibə nəticəsində sıxlaşır və lokal optik sıxlıq artır. Nəticədə sındırma əmsalı yüksəlir. Sönmə əmsalı isə bu halda daha aşağı olmuşdur, çünki sıx və homogen quruluş işığın absorpsiyasını və səpilməsini azaldaraq optik şəffaflığı artırır. Yavaş soyutmada isə zəncirlər relaksasiya edir, lokal kristallik və amorf sahələr arasında nizamsız keçidlər formalaşır. Bu heterogenlik işığın yayılmasına mane olaraq daxili itkiləri artırır və sönmə əmsalını yüksəldir.

## NƏTİCƏLƏR

1. Müxtəlif konsentrasiyalı ( $C'_{Si} = 1.5\%$ ,  $C''_{Si} = 3\%$ ) və kristallaşmanın fərqli temperatur-zaman (KTZ) rejimlərinə (maye azotda sürətli soyutma,  $0^{\circ}\text{C}$  temperaturu suda soyutma və havada yavaş soyutma) uyğun Si nanohissəcikləri ilə modifikasiya olunmuş PS və PVX əsaslı yeni nanokompozit materiallar alınmışdır.

2. SEM, KEM və RD tədqiqatlarının nəticələri göstərmişdir ki, Si nanohissəcikləri PS və PVX polimer matrislərinin həcminə nüfuz edir və polimer-nanohissəcik sərhəddində effektiv fazalararası qarşılıqlı təsirdə olur.

3. İQ və Raman spektroskopiya metodları ilə aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, Si nanohissəcikləri səthindəki silan qrupları hesabına PS polimeri ilə induksiya, PVX polimeri ilə isə oriyentasiya xarakterli qarşılıqlı təsir yaradır.

4. Sinxron termiki analizin nəticələri göstərir ki, Si nanohissəciklərinin konsentrasiyasının artması Si-PS və Si-PVX nanokompozitlərinin termal davamlılığını artırır, destruksiya sürətini azaldır və şüşələşmə temperaturunu yüksəldir. Polimerdə dispersiya olunmuş hissəciklər piroliz zamanı uçucu məhsulların çıxışını məhdudlaşdıraraq destruksiya prosesini ləngidir.

5. Coats-Redfern metodu ilə Si-PS və Si-PVX nanokompozitlərinin kinetik və termodinamik parametrləri ( $\alpha$ ,  $E_a$ ,  $\Delta G^{\#}$ ,  $\Delta H^{\#}$ ,  $\Delta S^{\#}$ ) hesablanmış və müvafiq asılılıqlar təhlil edilərək göstərilmişdir ki, Si nanohissəcikləri polimer matrislərinə daxil olduqda sistem daha strukturlaşmış hala keçir. Lakin bu təsir konsentrasiyadan asılı olaraq qeyri-xətti xarakter daşıyır: 1.5% Si-də maksimuma çatır, 3%-də isə aqreqasiya səbəbilə zəifləyir.

6. Spektroskopik ellipsometriya nəticələri göstərir ki, həm normal, həm də anomal dispersiya oblastlarında Si-PVX nanokompozitinin sındırma əmsalı Si-PS sistemi ilə müqayisədə, Si nanohissəciklərinin konsentrasiyasından daha güclü asılılıq nümayiş etdirir. Həmçinin, sındırma əmsalının kristallaşmanın temperatur-zaman rejimindən asılılığı müəyyən edilmişdir: maye azotda soyudulmuş Si-PS nanokompoziti ən kiçik sındırma əmsalına malik olduğu halda, eyni şəraitdə alınmış Si-PVX nanokompozitinin sındırma əmsalı daha yüksək olur.

## Dissertasiya işinin mövzusu üzrə dərc olunmuş elmi işlər:

1. Həsənova, M., Addayeva, Z., Şirinova, H., Surxaylı Ə. Kristallaşma sürətinin PS-silisiyum dioksid sistemində qadağan olunmuş zonanın optik eninə təsiri // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların “Şuşa ili”nə həsr olunmuş “Fizika və astronomiya problemləri” mövzusunda XXII Respublika Elmi konfransının materialları, – Bakı: – 20 may, – 2022, – s.128-129.
2. Şirinova, H.A., Həsənova, M. R., Addayeva, Z. R. Surxaylı, Ə.E. PS+SiO<sub>2</sub> əsaslı nanokompozitlərin termik davamlılığına doldurucunun konsentrasiyasının təsiri // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illik yubileyinə həsr olunmuş “Fizika və astronomiya problemləri” mövzusunda XXIII Respublika Elmi konfransının materialları, – Bakı: – 25 may, – 2023, – s. 137-138.
3. Surxaylı, Ə.E. Nano ölçülü silisiyum hissəcikləri əsasında polimer nanokompozitlərin alınması və quruluşu / Ə.E.Surxaylı, B.G.Paşayev, H.A.Şirinova [və b.] // Bakı Universitetinin Xəbərləri: Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – 2023. Oct.; № 1, – p. 86-91.
4. Surkhayli, A.E., Shirinova, H.A., Pashayev, B.G. PVC/Si polymer nanocomposites with potential electronic application // 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference: Modern Directions and Movements in Science, – Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg: – 26 – 28 October, 2023, – pp.190-192.
5. Surkhayli, A.E., Pashayev, B.G., Shirinova, H.A. Raman studies on Si/PS nanocomposite // 8<sup>th</sup> International Conference “Modern Trends in Physics” Dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of national leader Heydar Aliyev: Book of Abstracts, – Bakı: 30 November – 1 December, – 2023, s. 181.
6. Surxaylı, Ə.E., Rəsulova, A.R., Feyzullayeva, T.M., Şirinova, H.A. PS-Si nanokompozitin sinxron termik analiz metodu ilə tədqiqi // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların “Yaşıl dünya naminə həmrəylik ili”nə həsr olunmuş “Fizika və astronomiya problemləri” mövzusunda XXIV Respublika Elmi konfransının materialları, – Bakı: – 17 may, – 2024, – s. s. 7-8.
7. Surkhayli, A.E., Pashayev, B.G., Shirinova, H.A. Polystyrene and silicon based nanocomposites: preparation and structure // Bakı

- State University Journal of Physics & Space Sciences, – 2024. Sep.; v. 1, № 3, – p. 15-22.
8. Surkhayli, A.E. Investigation of infrared and Raman spectra of polymer nanocomposites based on polycrystalline silicon nanoparticles / A.E.Surkhayli, H.A.Shirinova, B.G.Pashayev [et al.] // AJP Fizika, – 2024. v. 4, – p. 17-22.
  9. Surkhayli, A.E., Shirinova, H.A., Pashayev, B.G. Fabrication, characterization and thermal properties of PVC+Si based polymer nanocomposites // Composite Interfaces, – 2025. Feb.; – p. 1-16. <https://doi.org/10.1080/09276440.2025.2467563>
  10. Shirinova, H. Optimizing thermal behavior in HIPS/silicon nanocomposites: The role of cooling rates / H.Shirinova, A.Surkhayli, B.Pashayev [et al.] // Journal of Elastomers & Plastics, – 2025. Mar.; v. 57, № 5, –pp. 639-655. <https://doi.org/10.1177/00952443251328187>
  11. Surkhayli, A.E., Pashayev, B.G., Shirinova, H.A. PVC/silicon composites: Correlation between supramolecular structure and thermal properties // 5<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference: Science and Education in Progress, – Dublin, Ireland: – 26 – 28 March, – 2025, – pp. 420-421.
  12. Shirinova, H. Preparation, characterization and thermal properties of the PS+Si based polymer nanocomposites / H.Shirinova, A.Surkhayli, B.Pashayev [et al.] // Journal of Thermoplastic Composite Materials, – 2025. Sep.; v. 38, № 5, – p. 1785-1798. <https://doi.org/10.1177/08927057241288195>

Handwritten signature or initials in blue ink.

Dissertasiyanın müdafiəsi **29 oktyabr 2025-ci il** tarixində saat **15<sup>00</sup>**-da Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az 1148, Bakı şəhəri, akad. Z. Xəlilov küçəsi, 33, Bakı Dövlət Universiteti, Əsas Bina

Dissertasiya ilə Bakı Dövlət Universitetinin Elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Bakı Dövlət Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 22 sentyabr 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 17.09.2025  
Kağızın formatı: 60×84 <sup>1</sup>/1<sub>6</sub>  
Həcm: 34 220 işarə  
Tiraj: 100 nüsxə