

Atf İçin: Gungör E, Kara Subaşat H, 2022. {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} Yeni Bileşiğin Sentezi, Kristal Yapısı ve Hidrojen Bağ Özellikleri. İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1489 - 1495.

To Cite: Gungor E, Kara Subasat H, 2022. Synthesis, Crystal Structure and Hydrogen Bond Properties of {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} New Compound. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1489 - 1495.

{[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} Yeni Bileşiğin Sentezi, Kristal Yapısı ve Hidrojen Bağ Özellikleri

Elif GÜNGÖR^{1*}, Hülya KARA SUBAŞAT²

ÖZET: Bu çalışmada, yeni bileşik {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} sentezlendi ve kristal yapısı belirlendi. Bileşik, monoklinik kristal sisteminde P2₁/n uzay grubunda a=3.8749 (8) Å, b=10.177 (2) Å, c=20.403 (4) Å, α=γ=90°, β=91.78° ve Z=2 birim hücre parametrelerinde kristallendi. Bileşikteki Pd iyonu inversiyon merkezinde ve dörtlü bir koordinasyona sahiptir. N–Pd–N* ve Cl–Pd–Cl* açıları 180° olduğu için, Pd iyonu kare düzlem geometriye sahiptir. Bileşikteki C–H···O, C–H···Cl ve π···π etkileşimleri, bc düzleminde ve a eksenini boyunca 3 boyutlu bir yapı oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek kristal yapı, Pd bileşiği, hidrojen bağ etkileşimleri

Synthesis, Crystal Structure and Hydrogen Bond Properties of {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} New Compound

ABSTRACT: In this study, the new compound {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} was synthesized and its crystal structure was determined. Compound crystallized in the space group P2₁/n in the monoclinic crystal system at a=3.8749 (8) Å, b=10.177 (2) Å, c=20.403 (4) Å, α=γ=90°, β=91.78° and Z=2 units cell parameters The Pd ion in the compound is at the inversion center and has a quaternary coordination. Because the N–Pd–N* and Cl–Pd–Cl* angles are 180°, the Pd ion has a square plane geometry. The C–H···O, C–H···Cl and π···π interactions in the compound form a 3-dimensional structure in the bc plane and along a axis.

Keywords: Single crystal structure, Pd compound, hydrogen bond interactions

¹ Elif GÜNGÖR ([Orcid ID: 0000-0002-7158-9604](https://orcid.org/0000-0002-7158-9604)), Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Balıkesir, Türkiye

² Hülya KARA SUBAŞAT ([Orcid ID: 0000-0002-2032-8930](https://orcid.org/0000-0002-2032-8930)), Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Bölümü, Muğla, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Elif GÜNGÖR, e-mail: egungor@balikesir.edu.tr

GİRİŞ

Boronik asit türevleri ve metal tuzlarının reaksiyonuyla farklı kristal yapıya sahip bileşikler elde edilmektedir. Bu bileşikler moleküler kimya (Fujita ve ark., 2008; James, 2016; Erkaslan ve ark., 2018), eczacılık ve tıp (Yang ve ark., 2003; Hall, 2011; Marinaro ve ark., 2012; Li ve ark., 2019; Zhu ve ark., 2020; Riha ve ark., 2022), biyoloji (Cai ve ark., 2002; Brooks ve Sumerlin, 2016; Tsuchido ve ark., 2019; Muz ve ark., 2022), tarım (Torborg ve Beller, 2009; Brdar-Jokanović, 2020; Sen ve ark., 2022), seramik ve metal yüzeyler (Campos-Gaxiola ve ark., 2017; Hernández ve ark., 2020; Acıkbas ve Calıs Acıkbas, 2022), imalat endüstrisinde çevre dostu madeni yağ üretimi (Damera ve Pasam, 2008; Nobrega ve ark., 2022), cilt tedavisi (Wang ve ark., 2020) ve sıvı kristal endüstrisi (Kim ve Kim, 2018; Zhu ve ark., 2022) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çeşitli tarım ilaçlarında, evde ve bahçede istenmeyen hamam böceği, sinekleri ve böcekleri öldürmek veya uzaklaştırmak için ilaçların yapısında bulunmaktadır (Habes ve ark., 2006; Kadam ve ark., 2015; Sierras ve ark., 2018; Cui ve ark., 2022). Antiviral ve antiseptik özelliğe sahip olan bileşikler göz ve kulak enfeksiyonları ve akıntılarında damla olarak, ağız gargarası, kesik, yara ve yanıklarda merhem, cilt losyonu ve krem olarak kullanılmaktadır (Karakuş ve ark., 2003; Obuobi ve ark., 2018; Çetiner ve ark., 2020; Wang ve ark., 2020). Seramik sanayisinde seramik yüzeylerini kaplama malzemelerinin akışkanlıklarını arttırmada, yoğunluklarını ve doygunlaştırma ısılarını düşürmede kullanılmaktadır (Hernández ve ark., 2022).

Aromatik N-oksitler ve türevleri, metal içeren bileşik oluşturabilen önemli köprüleme ligandlarıdır (Aakeröy ve Salmon, 2005; Hall, 2011; Hezil, 2016). Bu nedenle pridin ligandları ile elde edilen ML₂X₂ tipi bileşiklerin kristal yapı özellikleri literatürde incelenmiştir (Yahsi ve ark., 2015; Gungor, 2017). Burada M, bir metal (Mn, Cd, Pd, Cu) L, pridin ligand ve X, Cl veya Br gibi bir halojendir. Bu bileşikler $\pi \cdots \pi$ ve moleküller arası etkileşimler nedeniyle istiflenerek katıhal yapılarında polimerik bir dizilim göstermiştir.

Kristal mühendisliğinde ve malzeme biliminde amaca uygun yeni fonksiyonel malzemeleri geliştirmek için $\pi \cdots \pi$ ve moleküller arası hidrojen bağ etkileşimleri araç olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardaki araştırmacılar için $\pi \cdots \pi$ ve moleküller arası hidrojen bağ etkileşimlerin doğasını anlamak, teknolojik uygulamalar için yeni malzemeleri tasarlamak ve sistemik olarak kontrol etmek önemlidir. Bu nedenle, kristal mühendisliği ve malzeme biliminin umut verici yapı taşlarından biri olan ve gelişen teknoloji ile birlikte uygulama alanları artan boronik asit ve türevlerini içeren yeni metal bileşiklerinin sentezi, kristal yapısının aydınlatılması ve hidrojen bağ etkileşimlerini incelemeyi hedefledik.

Bu çalışmada, metal komplekslerinin kristal yapısının önemi dikkate alınarak kristal mühendisliği alanında alternatif olabilecek polimerik bir yapıya sahip olan yeni {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} bileşiğin yapısal karakterizasyonu rapor edildi.

MATERYAL ve METOT

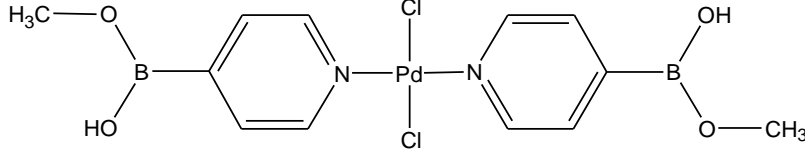
Kullanılan kimyasal maddeler ve çözücüler Sigma-Aldrich firmasından ticari olarak alındı. LECO-CHNS-932 marka cihazı ile C, H ve N element analizi gerçekleştirildi. Bruker Apex II X-Işınları Tek Kristal Difraktometre cihazı ile tek kristal X-ışınımı şiddet verileri elde edildi. Şiddet verilerine absorpsiyon, lorentz ve polarizasyon düzeltmeleri SAINT (Bruker-AXS, 2008) programında yapıldı. Bileşiğin yapısı OLEX2 programında (Dolomanov ve ark., 2009) ve SHELXTL (Sheldrick, 2008) üzerinde küçük kareler yöntemi kullanıldı. Hidrojen bağ etkileşimleri MERCURY (Macrae ve ark., 2006) programı ile oluşturuldu.

{[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} Bileşiğin Sentezi

4-Pridin boronik asit (61.4 mg, 0.5 mmol) ve K₂PdCl₂ (80 mg, 0.25 mmol) 10 ml %37 seyreltik HCl'de ayrı ayrı çözüldü ve birleştirildi. Birleştirilen çözelti kaynama noktası sıcaklığında (~110°C)

tutularak 30 dakika karıştırıldı ve bekleme bırakıldı. Çözücü buharlaştıktan birkaç hafta sonra oluşan kristaller süzülerek toplandı. Bileşiğin molekül yapısı Şekil 1'de görülmektedir.

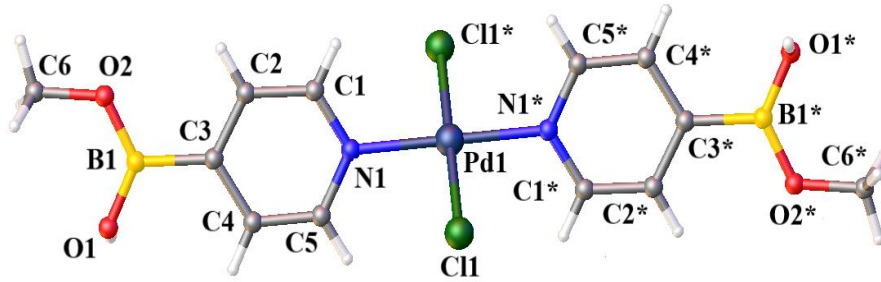
C₁₂H₁₆B₂Cl₂N₂O₄Pd, verim % 80. Teorik element analizi (%): C 31.94; H 3.57; N 6.21. Deneysel Element Analizi (%): C 30.850; H 2.910; N 6.502.



Şekil 1. Bileşiğin şematik gösterimi

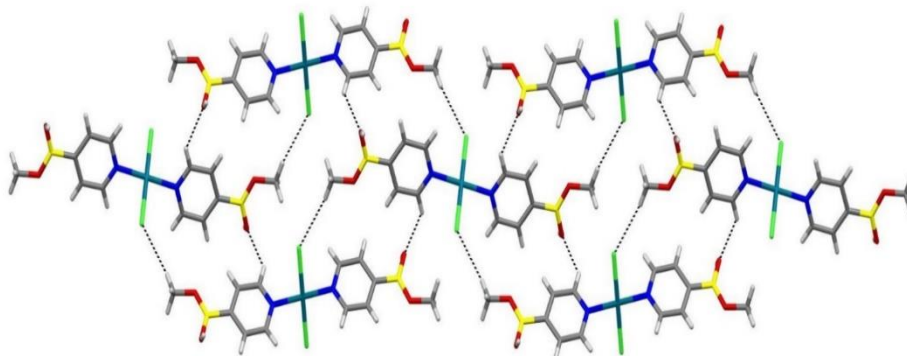
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bileşik, monoklinik kristal sisteminde P2₁/n uzay grubuna sahiptir. Bileşiğin asimetric biriminde {[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} molekülünün yarısı bulunmaktadır. Bileşikteki Pd^{II} atomu kristalografik inversiyon merkezinde yer alır ve dördü bir koordinasyona sahiptir. Bileşikteki iki piridin halkası eş düzlemseldir ve N1–Pd1–N1* ve Cl1–Pd1–Cl1* açıları, [* = -x, -y+2, -z] 180°'dir. Bu nedenle Pd^{II} iyonu kare düzlem geometriye sahiptir. Pd-N ve Pd-Cl bağ uzunlukları sırasıyla 2.307(4) Å ve 2.022(12) Å'dur. Bileşikte B atomunun koordinasyon açılarının toplamı 369.8(14) ° ve B–O bağ uzunluğu ortalama 1.35(2) Å'dur. Bileşiğin bağ uzunlukları ve bağ açıları literatürde rapor edilen benzer yapıların özellikleri ile uyum içindedir (Yahsi ve ark., 2015; Gungor, 2017).

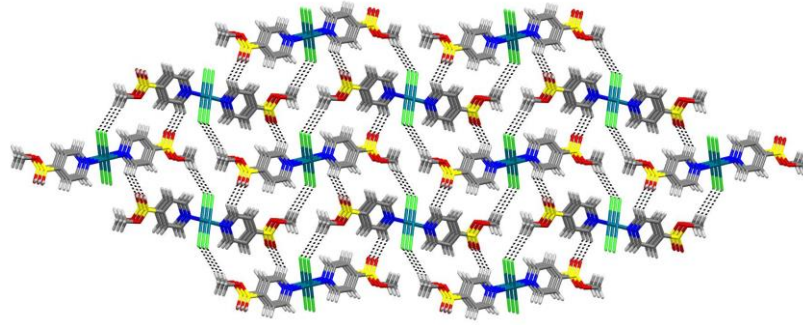


Şekil 2. Bileşiğin molekül yapısı

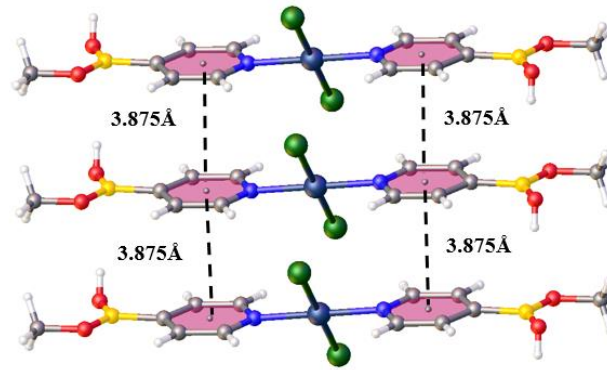
Bileşikte moleküller arası C–H...O ve C–H...Cl bağ etkileşimleri bulunmaktadır (Şekil 3, Çizelge 3). Bu bağlar Şekil 3'te olduğu gibi bir boyutta polimerik zincir bir yapı oluşturmaktadır. C6–H6B...Cl4 etkileşiminde H...Cl mesafesi 2.83 Å'dur. H...Cl mesafesi bu iki atomun van der Waals yarıçaplarının toplamından daha kısadır (H...Cl için 2.95 Å) (Kinzhlov ve ark., 2017). Bir boyutta hidrojen bağlı zincir yapıdaki moleküller C–H...O ve C–H...Cl etkileşimleri ile paketlenir ve üç boyutta bir yapı oluşturmaktadır (Şekil 4). Hidrojen bağlı bu yapı, bc-düzleminde yer alır ve a-ekseni boyunca istiflenir. Ayrıca, a eksenini boyunca istiflenen yapı π...π etkileşimleriyle daha da kararlı hale gelir. İstiflenen piridin zincirleri arasındaki mesafe 3.875 Å'dur (Şekil 5).



Şekil 3. C–H...O ve C–H...Cl etkileşimleri ile oluşan bir boyutlu zincir yapı



Şekil 4. Bileşiğin üç boyutlu yapısı.

Şekil 5. $\pi \cdots \pi$ etkileşmesi

Çizelge 1. Bileşiğin kristalografik verileri

CCDC No	2152970
Molekül formülü	C ₁₂ H ₁₆ B ₂ Cl ₂ N ₂ O ₄ Pd
Molekül Ağırlığı (g mol ⁻¹)	451.19
Kristal sistem	Monoklinik
Uzay Grubu	P2 ₁ /n
Birim Hücre Parametreleri	a=3.8749 (8) Å α=90° b=10.177 (2) Å β=91.78° (3) c=20.403 (4) Å γ=90°
V (Å ³)	804.2 (3)
Z	2
T (K)	100
h indeks	-5 ≤ h ≤ 5, -13 ≤ k ≤ 13, -26 ≤ l ≤ 26
ρ _{calc} (g/cm ³)	1.863
μ (mm ⁻¹)	1.504
Toplanan Yansımalar	8555
Bağımsız Yansımalar	1820 [R _{int} =0.054]
Gözlenen Yansıma Sayısı	1714
S	1.22

Çizelge 2. Seçilen geometrik parametreler (Å, °)

Bağ uzunluğu		Bağ açıları	
Pd1–Cl1	2.307(4)	Cl1*–Pd1–Cl1	180
Pd1–N1	2.022(12)	N1–Pd1–N1*	180
B1–O2	1.36(2)	N1–Pd1–Cl4*	90.3(4)
B1–O1	1.34(2)	N1*–Pd1–Cl4*	89.7(4)
		N1–Pd1–Cl4	89.7(4)
		N1*–Pd1–Cl4	90.3(4)
		O1–B1–O2	126.7(14)
		C4–C3–B1	121.8(14)
		C2–C3–B1	121.1(14)

(*) -x, -y+2, -z

Çizelge 3. Hidrojen bağları (Å, °)

D–H...A*	D–H	H...A	D...A	D–H...A	Simetri
C2–H2...O2	0.95	2.55	2.889	101	
C6–H6B...Cl4	0.98	2.83	3.717	151	1/2-x, 1/2+y, 1/2-z

SONUÇ

{[HNC₅H₄B(OH)(OCH₃)-4]₂PdCl₂} bileşiğı sentezlendi ve kristal yapısı tek kristal X-ışını kırınımı difraktometresi ile karakterize edildi. Bileşikteki dört koordinasyonlu Pd iyonu kare düzlem geometriye sahiptir. C–H···O ve C–H···Cl moleküller arası etkileşimler polimerik zincir bir ağ oluşturur. Bu ağ, *bc* düzleminde ve *a* eksenı boyunca $\pi \cdots \pi$ etkileşimleriyle istiflenerek 3 boyutlu kararlı bir yapı oluşturdu.

TEŞEKKÜR

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Aakeröy CB, Desper J and Levin B, 2005. Crystal Engineering Gone Awry and The Emergence of The Boronic Acid–Carboxylate Synthron. *CrystEngComm*, 7:102–107.
- Acıkbas G, Calıs Acıkbas N, 2022. The Effect of Sintering Regime on Superhydrophobicity of Silicon Nitride Modified Ceramic Surfaces. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 734-744.
- Brdar-Jokanović M, 2020. Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. *International Journal of Molecular Science*, 21(4):1424.
- Brooks WLA and Sumerlin BS, 2016. Synthesis and Applications of Boronic Acid-Containing Polymers: From Materials to Medicine. *Chemical Reviews*, 116:1375–1397.
- Cai D, Larsen, RD and Reider PJ, 2002. Effective Lithiation of 3-Bromopyridine: Synthesis of 3-Pyridine Boronic Acid and Variously 3-Substituted Pyridines. *Tetrahedron Letters*, 43:4285–4287.
- Campos-Gaxiola JJ, García-Grajeda BA, Hernández-Ahuactzi IF, Guerrero-Álvarez JA, Höpfl H and Cruz-Enríquez A, 2017. Supramolecular Networks in Molecular Complexes of Pyridine Boronic Acids and Polycarboxylic Acids: Synthesis, Structural Characterization and Fluorescence Properties. *CrystEngComm*, 19:3760–3775.
- Çetiner H, Şenol FF, Düzer S, 2020. Klinik Araştırma Akut Diffüz Eksternal Otit Tedavisinde Borik Asidin ve Dekametazon- Siprofloksasin Kombinasyonunun İyileşmeye ve Mikrobiyal Flora Üzerine Etkisi. *Fırat Tıp Dergisi*, 25:219–223.
- Cui X, Wang Y, Yan Y, Meng Z, Lu R, Gao H, Pan C, Wei X, Zhou W, 2022. Phenylboronic Acid-Functionalized Cross-Linked Chitosanmagnetic Adsorbents for The Magnetic Solid-Phaseextraction of Benzoylurea Pesticides. *Journal of Separation Science* 45:908–918.
- Damera NR and Pasam VK, 2008. Performance Profiling of Boric acid as Lubricant in Machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 3:239-244.
- Dolomanov OV, Bourhis LJ, Gildea RJ, Howard, JAK and Puschmann H, 2009. OLEX2: A Complete Structure Solution, Refinement and Analysis Program. *Journal of Applied Crystallography*, 42:339–341.
- Erkarıslan U, Dönmez A, Kara Subaşıat H, Aygün M, Çoban MB, 2018. Synthesis, Structure and Photoluminescence Performance of a New Er³-Cluster-Based 2D Coordination Polymer. *Journal of Cluster Science*, 29: 1177-1183.
- Fujita N, Shinkai S and James TD, 2008. Boronic Acids in Molecular Self-Assembly. *Chemistry An Asian Journal*, 3:1076–1091.

- Gungor E, 2017. 3-D Polymeric Structure Formed by Hydrogen Bonds of Copper (II) Complex. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 642:21–28.
- Habes D, Morakchi S, Aribi N, Farine JP and Soltani N, 2006. Boric Acid Toxicity to The German Cockroach, *Blattella Germanica*: Alterations in Midgut Structure, And Acetylcholinesterase and Glutathione S-Transferase Activity. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 84:17–24.
- Hall DG, 2011. In *Boronic Acids: Preparation and Applications in Organic Synthesis, Medicine and Materials* Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Hernández MF, López PV, Conconi MS and Rendtorff NM, 2022. Effect of Boron Sources in The Thermal Behavior of A Clay-Based Ceramics. *Open Ceramics*, 100227.
- Hernández MF, Violini MA, Serra MF, Conconi MS, Suarez G and Rendtorff NM, 2020. Boric Acid (H₃BO₃) as Flux Agent of Clay-Based Ceramics, B₂O₃ Effect in Clay Thermal Behavior and Resultant Ceramics Properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139:1717–1729.
- Hezil H, 2016. Preparation, Structural and Thermal Studies of Boroxine Adducts Having Aryl Boronic Acids and Pyrazoles. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 10:42–55.
- James TD, 2016. Self and Directed Assembly: People and Molecules. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 12:391–405.
- Kadam RN, Shendge RS and Pande VV, 2015. A Review of Nanotechnology with an Emphasis on Nanoplex. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 51:255–263.
- Karakuş MF, Arda HN, İkinciogullari A, Gedikli Y, Coşkun S, Balaban N and Akdogan O, 2003. Asteatosis ve Kaşıntılı Hastalarda Dış Kulak Yolu Mikrobiyolojisi. *Kulak Burun Bogaz İhtisas Dergisi*, 11:33–38.
- Kim K and Kim K, 2018. Valuable Recycling of Waste Glass Generated from The Liquid Crystal Display Panel Industry. *Journal of Cleaner Production* 174:191–198.
- Kinzhlov MA, Novikov AS, Chernyshev AN and Suslonov VV, 2017. Intermolecular Hydrogen Bonding H···Cl⁻ in The Solid Palladium(II)-Diaminocarbene Complexes. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 232:299–305.
- Li B, Li T, Aliyu MA, Li ZH, Tang W, 2019. Enantioselective Palladium-Catalyzed Cross-Coupling of α -Bromo Carboxamides and Aryl Boronic Acids. *Angewandte Chemie*, 201905174.
- Macrae CF, Edgington PR, McCabe P, Pidcock E, Shields GP, Taylor R, Towler M and van de Streek J, 2006. Mercury: Visualization and Analysis of Crystal Structures. *Journal of Applied Crystallography*, 39:453–457.
- Marinara WA, Schieber LJ, Munson EJ, Day VW and Stella VJ, 2012. Properties of A Model Aryl Boronic Acid and Its Boroxine. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 101:3190–3198.
- Muz B, Azab AK, Confalonieri L, Grosso ED, Fallarini S, Imperio D, Panza L, 2022. Synthesis, Equilibrium, and Biological Study of a C-7 Glucose Boronic Acid Derivative as a Potential Candidate for Boron Neutron Capture Therapy. *Bioorganic Medicinal Chemistry*, 59:116659.
- Rihan M, Nalla LV, Dharavath A, Patel S, Shard A, Khairnar A, 2022. Boronic Acid Derivative Activates Pyruvate Kinase M2 Indispensable for Redox Metabolism in Oral Cancer Cells. *Bioorganic Medicinal Chemistry Letter*, 59:128539.
- Nobrega G, Rodrigues de Souza R, Gonçalves IM, Moita AS, Ribeiro JE, Lima RA, 2022. Recent Developments on the Thermal Properties, Stability and Applications of Nanofluids in Machining, Solar Energy and Biomedicine. *Applied Sciences*, 12:1115-1133.

- Obuobi S, Voo ZX, Low MW, Czarny B, Selvarajan V, Ibrahim NL, Yang YY and Ee PLR, 2018. Phenylboronic Acid Functionalized Polycarbonate Hydrogels for Controlled Release of Polymyxin B in Pseudomonas Aeruginosa Infected Burn Wounds. *Advanced Healthcare Materials*, 7:1701388.
- Sen S, Mondal N, Ghosh W and Chakraborty R, 2022. Inducible Boron Resistance Via Active Efflux in Lysinibacillus And Enterococcus Isolates From Boron-Contaminated Agricultural Soil. *BioMetals*, 35:215–228.
- Sheldrick GM, 2015. Crystal Structure Refinement with SHELXL. *Acta Crystallographica Section C Structural Chemistry*, 71:3–8.
- Sheldrick GM, SADABS V2008/1, University of Göttingen, Germany.
- Sierras A, Wada-Katsumata A and Schal C, 2018. Effectiveness of Boric Acid by Ingestion, But Not by Contact, Against the Common Bed Bug (Hemiptera: Cimicidae). *Journal of Economic Entomology*, 111:2772–2781.
- SAINT V7.60A, Bruker-AXS, 2008. Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Torborg C and Beller M, 2009. Recent Applications of Palladium-Catalyzed Coupling Reactions in the Pharmaceutical, Agrochemical, and Fine Chemical Industries. *Advanced Synthesis and Catalysis*, 351:3027–3043.
- Tsuchido Y, Horiuchi R, Hashimoto T, Ishihara K, Kanzawa N and Hayashita T, 2019. Rapid and Selective Discrimination of Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria by Boronic Acid-Modified Poly(amidoamine) Dendrimer. *Analytical Chemistry*, 91:3929–3935.
- Wang P, Pei D, Wang Z, Li M, Ma X, You J and Li C, 2020. Biocompatible and Self-Healing Ionic Gel Skin as Shape-Adaptable and Skin-Adhering Sensor of Human Motions. *Chemical Engineering Journal*, 398: 125540.
- Yahsi Y, Gungor E and Kara H, 2015. Chlorometallate-Pyridinium Boronic Acid Salts for Crystal Engineering: Synthesis of 1D, 2D and 3D Hydrogen Bond Networks. *Crystal Growth and Design*, 15: 2652–2660.
- Yang W, Gao X and Wang B, 2003. Boronic Acid Compounds as Potential Pharmaceutical Agents. *Medicinal Research Reviews*, 23:346–368.
- Zhu Q, Saeed M, Song R, Sun T, Jiang C, Yu H, 2020. Dynamic Covalent Chemistry-Regulated Stimuli-Activatable Drug Delivery Systems for Improved Cancer Therapy. *Chinese Chemical Letter*, 31:1051–1059.
- Zhu Y, Zeng S, Li B, McEllin AJ, Liao J, Fang Z, Xiao C, Bruce DW, Zhu W, Wang Y, 2022. Liquid-Crystalline Thermally Activated Delayed Fluorescence: Design, Synthesis, and Application in Solution-Processed Organic Light-Emitting Diodes. *Applied Materials Interfaces*, 14:15437–15447.