



Sl. 29. Helikopter prenosi teret u besputnom kraju

U civilnoj primjeni, pored kontrole prometa i prijenosa bolesnika radi hitnih intervencija, helikopter služi za transport elemenata konstrukcija koje se grade u besputnim krajevima te za prijevoz putnika (sl. 29).

Konstrukcija helikoptera zajedno s opremom uspješno je riješena s obzirom na zadane funkcije. Proizvodni troškovi, tehnološke teškoće i strogi zahtjevi kontrole kvalitete i funkcionalnih ispitivanja, te relativno mali vijek trajanja lopatica, ograničenja su zbog kojih je cijena helikoptera još relativno visoka, a njegova primjena nesrazmjerno manja od stvarnih potreba.

Neki proizvođači helikoptera, kao što su Sikorsky, Bell, Hughes, Westland, Sud Aviation, Bölkow, Agusta i proizvođači u SSSR, dostigli su visoku tehničku razinu kvalitete zajedno s razvojem obujma produkcije. U nas je bio u proizvodnji licenčni helikopter S-55 u radnoj organizaciji Soko-Mostar.

LIT.: M. L. Mиль, A. B. Некрасов, A. B. Браверман, Л. Н. Гродко, М. А. Леканд, Вертолёты. Издательство Машиностроение, Москва 1966/67 (1. Аэродинамика 1966, 2. Колебания и динамическая прочность 1967). — R. Hafner, British rotorcraft. Journal of the Royal Aeronautical Society, Centenary Journal 1966. — Interavia, 1/1976, 3/1976, 4/1977. — Wehrtechnik, 4/1977. — T. L. Ciasula, The Development of the P. 531. Royal Aeronautical Society, London 1963. — Д. Й. Базов, Аэродинамика вертолётов. Москва 1959.

M. Momirski

**HETEROCIKLIČKI SPOJEVI**, ciklički organski spojevi u kojima se u prstenima pored ugljikovih atoma nalazi i neki drugi atom ili atomi (heteroatomi). Najčešći heteroatomi jesu kisik, dušik i sumpor. Mnogi su heterociklički spojevi biološki veoma važni. Heterociklički prsteni, kao dijelovi složenih spojeva, nalaze se u mnogim prirodnim tvarima i spojevima bitnim za odvijanje životnih funkcija u biljnom i životinjskom svijetu (v. *Alkaloidi*, TE1, str. 202, *Antibiotici*, TE1, str. 302, *Vitamini*). Sastavni su dio brojnih lijekova, bojila (v. *Bojila*, TE2, str. 84), sredstava za zaštitu bilja, insekticida itd., u kojima su to često dijelovi koji molekulama takvih tvari daju potrebnu aktivnost. Heterociklički spojevi ponašaju se slično karbocikličkim spojevima sa sličnom elektronskom strukturom, uz neka specifična svojstva zbog prisustva heteroatoma u molekuli. Tako npr. aromatski heterociklički spojevi pokazuju kemijska svojstva slična aromatskim spojevima bez heteroatoma (v. *Aromatski ugljikovodici*, TE1, str. 418), te podliježu reakcijama elektrofilne supstitucije, ali uz neke razlike u brzinama i mjestu reakcije. Postoje, međutim, i razlike u kemijskim svojstvima kao što je npr. bazičnost piridina u usporedbi s benzenom kao posljedica mogućnosti dušika da daje slobodan par elektrona (Lewisova baza).

Nazivlje (nomenklatura) heterocikličkih spojeva jest složeno zbog brojnih *nesistematskih* trivijalnih i polutrivijalnih imena, koja su u upotrebi za mnoge poznate i jednostavnije spojeve (tabl. 1).

Tablica 1

PRIMJERI NESISTEMATIČNIH IMENA HETEROCIKLIČKIH SPOJEVA

furan	tiofen	pirol	izotiazol	pirazol
imidazol	piridin	piperidin	piridazin	pirimidin
pirazin	indol	kinolin	purin	

*Sistematska imena* monocikličkih spojeva koji sadrže 3-10 atoma u prstenu, te jedan ili više heteroatoma, tvore se vezanjem prefiksa, koji opisuju heteroatom, na osnovno ime koje označuje broj atoma u prstenu. Tako se za heteroatome koji se najčešće susreću, tj. kisik, sumpor, dušik, selen i telur, upotrebljavaju prefiksi *oksa-*, *tia-*, *aza-*, *selena-* i *telura-* (završetak *a* obično se izostavlja). Osnovna se imena temelje na veličini prstena (tabl. 2). Imena nezasićenih spojeva odnose se na spojeve, čiji prsteni posjeduju maksimalan broj konjugiranih dvostrukih veza. Djelomična nezasićenost izražava se prefiksima, npr. dihidro-, tetrahidro- itd. Označavanje atoma u prstenu brojevima počinje uvijek od heteroatoma. Imena spojeva s više istovjetnih heteroatoma sadrže prefiks *di-*, *tri-* itd.,

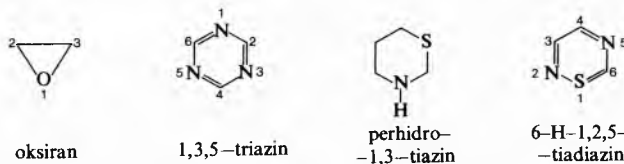
Tablica 2

OSNOVE ZA TVORBU SISTEMATSKIH IMENA HETEROCIKLIČKIH SPOJEVA

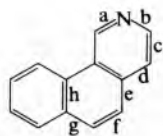
Broj atoma u prstenu	Prsteni bez dušika		Prsteni s dušikom	
	zasićeni	nezasićeni	zasićeni	nezasićeni
3	-iran	-iren	-iridin	-irin
4	-etan	-et	-ctidin	-et
5	-olan	-ol	-olidin	-ol
6	-an	-in	*	-in
7	-epan	-epin	*	-epin
8	-ocan	-ocin	*	-ocin
9	-onan	-onin	*	-onin
10	-ecan	-ecin	*	-ecin

\* Pred ime nezasićenog spoja stavlja se prefiks *perhidro-*

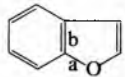
a atomi se označuju brojevima na taj način da heteroatomi imaju najmanje moguće brojeve. Kada je u prstenu prisutno više različitih heteroatoma, nabrajanja prefiksa i brojanje pokorava se dogovornom redosljedju: kisik, sumpor, selen, telur, dušik, fosfor, arsen itd. Nekoliko slijedećih primjera ilustriraju navedena pravila za nomenklaturu heterocikličkih spojeva:



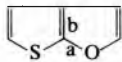
Imena heterocikličkih spojeva s *priljubljenim* (kondenziranim) prstenima tvore se često dodavanjem prefiksa *benz-* ili *benzo-* na osnovno ime monocikličkog spoja. U spojevima s različitim heteroatomima temelj imena je prsten s dušikom. Ako spoj ne sadrži dušik, redosljed nabrajanja heteroatoma je isti kao u imenima monocikličkih spojeva:



benzo[h]izokinolin



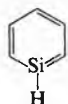
benzo[b]furan



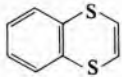
tieno[2,3-b]furan

U nazivima tih spojeva slova u zagradi označuju položaj priljubljene veze, a brojevi označuju redoslijed brojenja ugljikovih atoma u spoju koji je vezan na temeljni heterociklički spoj.

Heterociklički spojevi mogu se imenovati i na taj način da se kao temelj uzme karbociklički spoj s navedenim prefiksima za heteroatome:



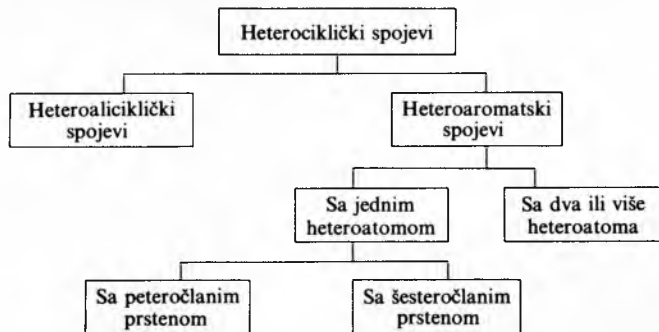
silabenzen



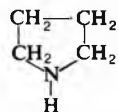
1,4-ditianaftalen

Heterocikličke grupe (radikali) imenuju se dodavanjem nastavka *-il*, osim nekih iznimaka. Divalentne grupe, nastale uklanjanjem dvaju atoma vodika s istog atoma ugljika, imenuju se dodatkom nastavka *-idem* na naziv jednovalentne grupe. Divalentne i viševalentne grupe, nastale uklanjanjem vodika s različitim ugljikovih atoma, imenuju se dodatkom *-diil*, *-triil* itd., na kraju imena osnovnog heterocikličkog spoja.

**Podjela heterocikličkih spojeva.** Heterociklički spojevi grupiraju se prema broju članova u prstenu i vrsti i broju heteroatoma u prstenu. Spojevi s priljubljenim (kondenziranim) prstenu mogu ući u spomenute grupe spojeva, a mogu se i izdvojiti u posebnu grupu. U ovom članku heterociklički spojevi svrstani su na slijedeći način:

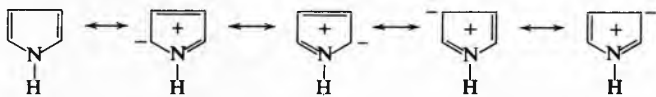


**Svojstva heterocikličkih spojeva. Heteroalicyklički spojevi.** Kemijska svojstva zasićenih heterocikličkih spojeva slična su svojstvima odgovarajućih lančastih spojeva. Tako se npr. heterociklički spojevi s dušikom ponašaju poput ostalih sekundarnih alifatskih amina. Zbog slobodnog elektronskog para dušika ponašaju se poput baza. Azolidin (pirolidin) posjeduje bazičnost koja se očekuje od sekundarnih amina (konstanta ionizacije,  $K_b \sim 10^{-3}$ ).



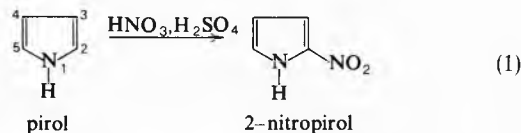
azolidin (pirolidin)

**Heteroaromatski spojevi.** Kao što im i ime govori, heteroaromatski spojevi slični su po svojim svojstvima karbocikličkim aromatskim spojevima. Pirol, furan i tiofen, kao tipični predstavnici heteroaromatskih spojeva s peteročlanim prstenom, mogu se predstaviti kao rezonantni hibridi, koji se sastoje od pet mogućih rezonantnih struktura:



U pirolu elektronski par dušika, zajedno s četiri  $\pi$ -elektrona iz prstena, stvara aromatski sekstet. Zbog toga elektronski par

na dušiku nije slobodan i ne stoji na raspolaganju za vezanje kiselina, pa je pirol vrlo slaba baza ( $K_b \sim 2,5 \cdot 10^{-14}$ ). Toplina spaljivanja tog spoja jest niža nego što bi se očekivalo od nezasićenog spoja sa dvije dvostruke veze. To pokazuje postojanje rezonancije koja stabilizira aromatski spoj. Slično karbocikličkim aromatskim spojevima, heterociklički aromatski spojevi podliježu reakcijama supstitucije (zamjene), a ne adicije. Pirol je reaktivniji od benzena, a supstitucija jednog vodika s elektrofilima, tj. s reagensima koji traže elektrone (elektrofilna supstitucija, v. *Kemija*), daje produkt supstituiran u položaju 2:

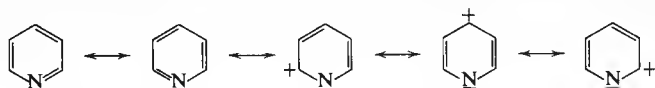


pirol

2-nitropirol

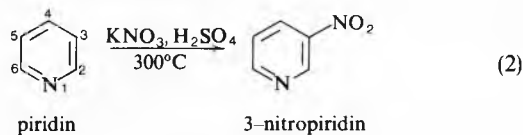
Furan i tiofen supstituiraju se s elektrofilnim reagensima na sličan način.

Piridin je izraziti predstavnik heteroaromatskih spojeva sa šesteročlanim prstenu. Reagira poput karbocikličkog aromatskog spoja, pa podliježe reakcijama elektrofilne supstitucije, a ne adicije. Piridin se može prikazati pomoću slijedećih rezonantnih struktura:



Elektronski par dušika u piridinu ne sudjeluje u stvaranju aromatskog seksteta i ostaje slobodan na  $sp^2$  orbitali dušika. Zato je piridin bazičniji od pirola ( $K_b \sim 10^{-9}$ ). Bazičnost je ipak manja nego što bi se očekivalo od sekundarnih amina ( $K_b \sim 10^{-4}$ ). Razlog je u tome što se elektronski par na dušiku sekundarnih amina nalazi u  $sp^3$  orbitali i mnogo je pokretljiviji od elektronskog para na dušiku piridina.

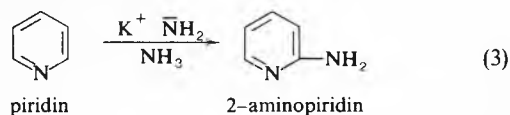
U reakcijama elektrofilne supstitucije piridin reagira sporije od benzena, a supstituent ulazi u položaj 3:



piridin

3-nitropiridin

Piridin se ne podvrgava Friedel-Craftsovim reakcijama (v. *Alkilacija*, TE1, str. 210) poput ostalih karbocikličkih aromatskih spojeva zbog slabije reaktivnosti u usporedbi s benzenom. Međutim, piridin se može lakše od benzena supstituirati s nukleofilima, tj. reagensima koji traže jezgru, nukleus (nukleofilna supstitucija, v. *Kemija*). U tim reakcijama zamjene supstituent ulazi u položaj 2 ili 4:



piridin

2-aminopiridin

Kompliciraniji heteroaromatski spojevi kemijski se ponašaju slično srodnim karbocikličkim aromatskim spojevima uz navedene razlike u reaktivnosti.

## METODE DOBIVANJA

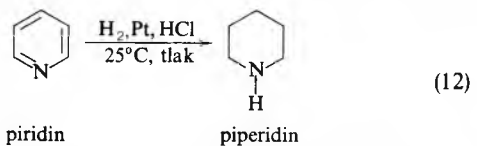
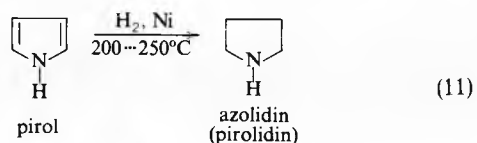
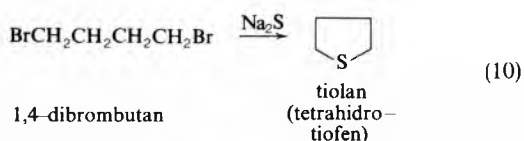
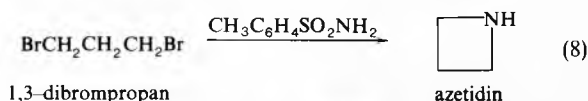
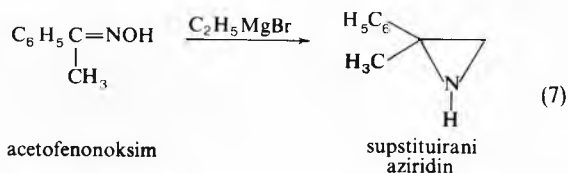
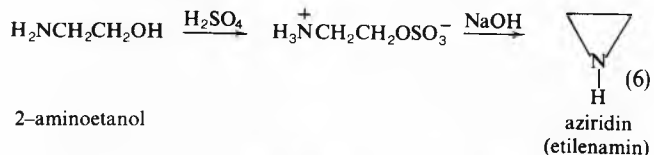
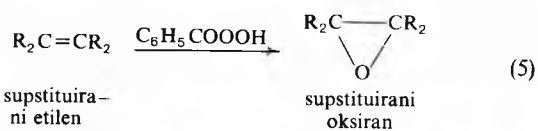
**Dobivanje heteroalicykličkih spojeva.** Većina heterocikličkih spojeva dobiva se iz lančastih spojeva zatvaranjem lanca u prsten. Pored toga postoje i specifične metode koje su često jeftinije i djelotvornije.

Heteroalicyklički spojevi pripravljuju se najčešće ciklizacijom lančastih spojeva ili hidrogeniranjem heteroaromatskih spojeva:

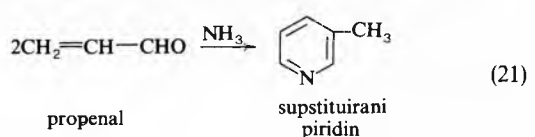
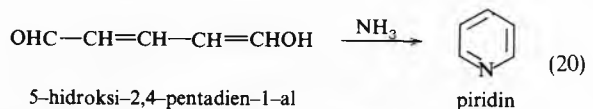
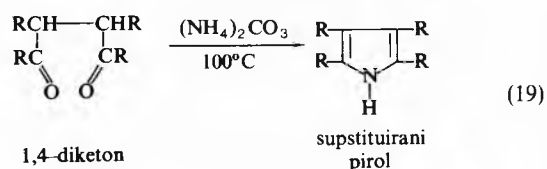
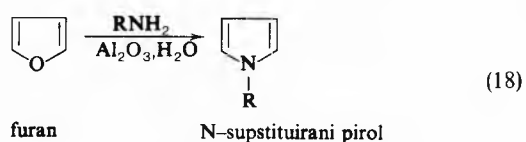
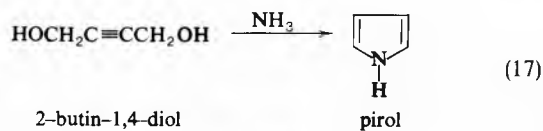
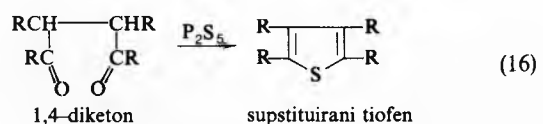
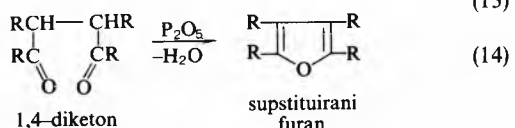
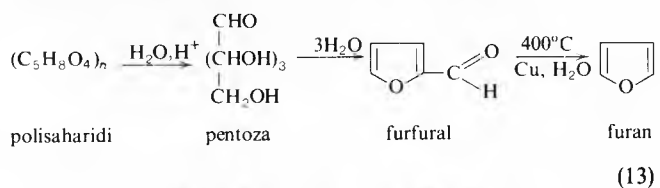


etilen

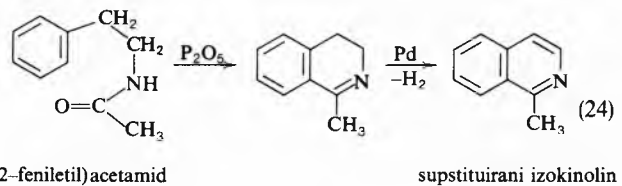
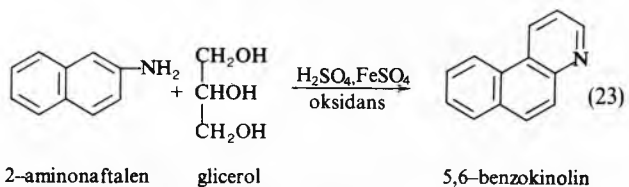
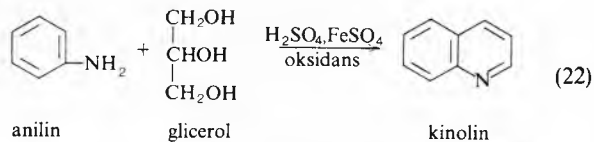
oksiran (etilenoksid)



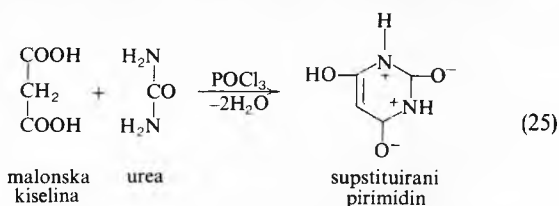
**Dobivanje heteroaromatskih spojeva.** Brojni heteroaromatski spojevi dobivaju se suhom destilacijom katrana kamenog ugljena. Poznate su također i sintetske industrijske metode dobivanja tih spojeva:



Među heteroaromatskim spojevima s *priljubljenim* prstenima vrlo su važni kinolin i izokinolin. Nalaze se u katranu kamenog ugljena, a mogu se, kao i njihovi derivati, pripraviti iz pogodnih derivata benzena zatvaranjem prstena. Poznate su Skraupova sinteza (22), (23) i sinteza Bischler-Napieralskoga (24):



Svaki od heteroaromatskih spojeva s *više istovrsnih heteroatoma* pripravlja se specifičnim načinom. Tako se npr. pirimidin i supstituirani pirimidini mogu dobiti na slijedeći način:



Zamjenom reaktanata u ovoj reakciji moguće je dobiti brojne supstituirane pirimidine.








Mnogi derivati heteroaromatskih spojeva mogu se dobiti elektrofilnom i nukleofilnom supstitucijom osnovnih, nesupstituiranih heterocikličkih spojeva.

### INDUSTRIJSKI VAŽNI HETEROCIKLIČKI SPOJEVI

#### Heteroalociklički spojevi

Heteroalociklički spojevi čiji su prsteni sastavni dio mnogih prirodnih spojeva i koji nalaze industrijsku, farmaceutsku ili neku drugu primjenu, navedeni su u tabl. 3.

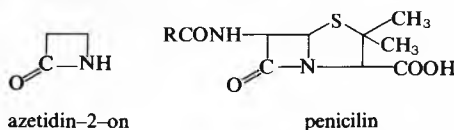
Tablica 3  
NAJVAŽNIJI HETEROALOCIKLIČKI SPOJEVI

Struktura	Ime		Vrelište °C
	Sistematsko	Nesistematsko	
	oksiran	etilenoksid epoksietan	10,7
	aziridin	etilenamin	56
	azetidin	trimetilenimin	61
	oksolan	tetrahidrofuran	66
	azolidin	pirolidin	88
	perhidroazin	piperidin	106
	1,4-dioksan		102

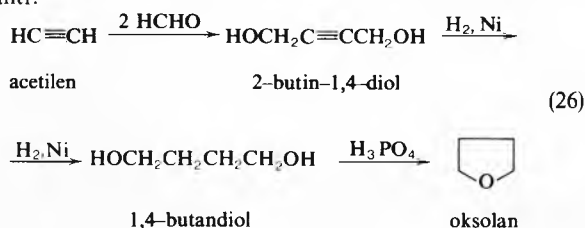
**Oksiran**, v. *Epoksidi*, TE5, str. 346.

**Aziridin** se upotrebljava za poboljšanje svojstava hidroksilnih polimera. Potencijalno je opasan zbog kancerogenih aktivnosti, ali se neki njegovi derivati ispituju kao mogući antikancerogeni spojevi.

**Azetidin** se pojavljuje vezan kao dio molekule antibiotika norkardamina. Derivat azetidina, azetidin-2-on, vezan je u molekule različitih penicilina.



**Oksolan** je poznatiji pod imenom tetrahidrofuran. Industrijski se proizvodi u velikim količinama ciklizacijom 1,4-butan-diola u sintezi u kojoj su acetilen i formaldehid polazni reaktanti:



Vrlo je pogodan kao otapalo jer se miješa s vodom u svim omjerima, što je rijetka pojava među organskim spojevima. Upotrebljava se u reakcijama s metalnim hidridima, u pripravi organometalnih spojeva i kao otapalo u pripravi polivinilklorida. Polazni je materijal za pripremu heksametilendiamina i adipinske kiseline, iz kojih se dobiva najlon.

**Azolidin** se nalazi vezan u nekim alkaloidima kojima daje bazični karakter.

**Piperidin** se dobiva hidrogeniranjem piridina. Piperidin je baza sa  $K_b \sim 10^{-3}$ , što odgovara bazičnosti sekundarnih amina. Često se upotrebljava kao organska baza u nizu važnih reakcija. Kao i azolidin, pojavljuje se vezan kao dio molekula brojnih alkaloida poput nikotina, strihnina, kokaina i rezerpina.

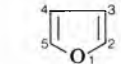


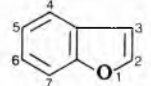
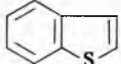
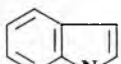
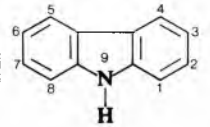
**1,4-Dioksan** se industrijski dobiva iz oksirana. Miješa se s vodom i s većinom organskih otapala u svim omjerima te je pogodan kao otapalo za neke boje, masti, smole i plastične mase.

#### Heteroaromatski spojevi

*Spojevi s jednim heteroatomom i peteročlanim prstenom*

Najvažniji heterociklički aromatski spojevi s jednim heteroatomom i s prstenom od pet članova, uključivši i spojeve s priljubljenim prstenima, navedeni su u tabl. 4.

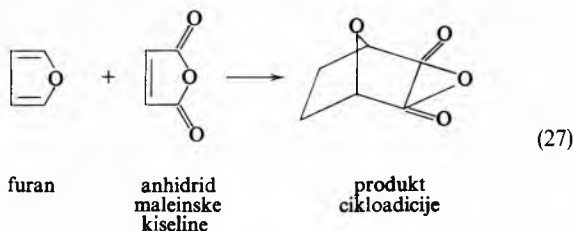
Tablica 4  
VAŽNIJI HETEROAROMATSKI SPOJEVI S JEDNIM HETEROATOMOM I PETEROČLANIM PRSTENOM

Struktura	Ime (nesistematsko)	Talište °C	Vrelište °C
	furan	-86	31
	tiofen	-38	84
	pirol	-18,5	129
	benzofuran	-28,5	173
	benzotiofen	32	221
	indol	52	254
	karbazol	245	354

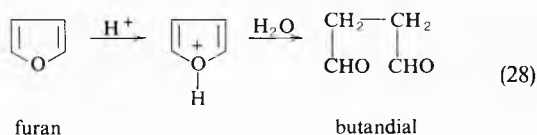
**Furan** je poznat već vrlo dugo. Furan-2-karboksilna kiselina (pirosuzna kiselina) dobivena je još 1780. godine, a furan-2-aldehid (furfural) 1832. godine. Struktura furana dokazana je 1877. godine pretvorbom furfurala u furan i u pimelinsku kiselinu, čija je struktura već prije bila poznata. Rezonantna energija furana izračunata iz topline nastajanja iznosi oko  $105 \text{ kJ mol}^{-1}$ , a slični računi temeljeni na toplini hidrogeniranja daju vrijednost od  $70 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Ti rezultati potvrđuju da je furan aromatski spoj i da jedan elektronski par kisika sudje-

luje u aromatskom sektetu  $\pi$ -elektrona. Kao i svaki drugi aromatski spoj, furan podliježe reakcijama elektrofilne supstitucije gdje su položaji 2 i 5 reaktivniji od položaja 3 i 4. Na taj se način mogu pripremiti halogenidi, furan-2-sulfonska kiselina i drugi derivati.

Furan se ponaša kao tipičan dien u Diels-Alderovoj reakciji. Tako s anhidridom maleinske kiseline daje cikloadiციjski produkt:



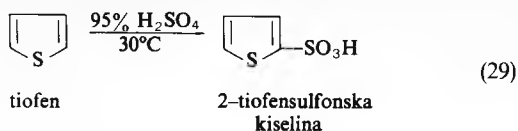
Furan podliježe i reakcijama tipičnim za etere, kao što je otvaranje prstena u kiselim uvjetima, ali se to mora provoditi uz dosta oštре uvjete, jer se u toj reakciji gube aromatska svojstva furanskog prstena:



Industrijski se furan dobiva katalitičkom obradom furfurala u vodenoj pari pod tlakom, prema (13). Furfural je komercijalno najvažniji heterociklički aromatski spoj s furanskom osnovom, jer služi kao polazni spoj u sintezama mnogih drugih derivata furana.

**Tiofen** je otkrio V. Meyer 1882. godine. Dobiva se sintezom iz butana i sumpora, prema (15). Izmjerene vrijednosti za rezonantnu energiju ovise o načinu mjerenja i iznose 85–125 kJmol<sup>-1</sup>. Kao aromatski spoj podvrgava se reakcijama elektrofilne supstitucije, u kojima je reaktivniji od benzena.

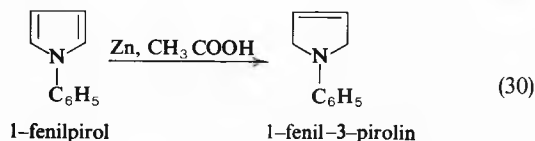
Supstitucija se odvija pretežno na položaju 2, odnosno 5:



Na sličan se način pripremaju halogenidi, a moguće je uz posebne uvjete dobiti 2-nitrotiofen. Ne podvrgava se Diels-Alderovoj cikloadiციiji poput furana i ne da se katalitički hidrogenirati zbog trovanja katalizatora sumporom. Tiofen i tetrahidrotiofen nalaze se u katranu ugljena, ali nisu nađeni slobodni u prirodi. Tetrahidrotiofen se pojavljuje vezan kao dio molekule biotina, koji je potreban za normalan rast kvasca. Relativno se malo upotrebljava u komercijalne svrhe, npr. u sintezi nekih lijekova.

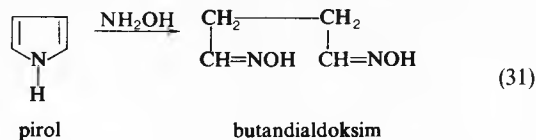
**Pirol** je pronađen 1834. godine pri destilaciji katrana kamenog ugljena. Postoji nekoliko industrijskih načina pripreve pirola i njegovih derivata, prema (17), (18), (19). Rezonantna energija pirola iznosi oko 105 kJmol<sup>-1</sup>. U reakciji supstitucije može doći do zamjene na dušikovom atomu ili na ugljikovim atomima. U prisutnosti baze pirol s metiljodidom i kiselinskim kloridima daje odgovarajući 1-metilpirol, odnosno 1-acilpirole. Na sličan način reagira pirol u baznom mediju s acilenom i drugim nezasićenim spojevima dajući 1-supstituirane derivate.

U elektrofilnoj aromatskoj supstituciji dobiju se pretežno spojevi supstituirani u položajima 2 i 5. U tim reakcijama pirol je vrlo reaktivan i halogeniranjem u metanolu vrlo se lagano dobiju tetrahalogenpiroli. Uz nešto oštrije uvjete dolazi do zamjene svih vodikovih atoma te nastaje pentahalogenpirol. Pirol se također podvrgava reakcijama adicije. Najčešće dolazi do 1,4-adicije u položaju 2 i 5, što je tipična reakcija 1,3-diena. Produkti takvih reakcija su 3-pirolini (dihidropirol):



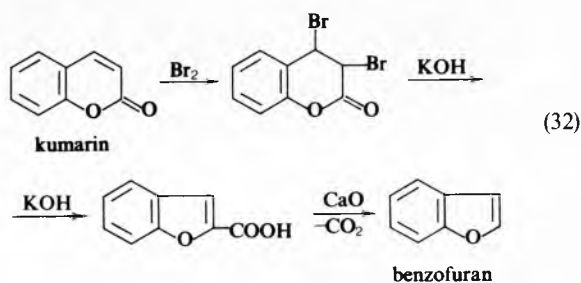
Iako pirol ne reagira u Diels-Alderovim reakcijama, neki supstituirani pirol daju Diels-Alderove cikloadiციjske produkte. Katalitičkim hidrogeniranjem pirola nastaje azolidin.

Prsten pirola može se otvoriti reakcijom s hidroksilaminom:



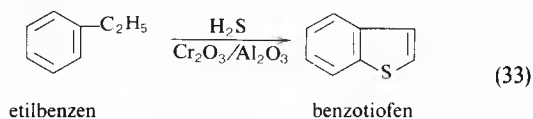
Tragovi pirola otkriveni su u dimu duhana. Pirol se kao dio veće molekule nalazi vezan u porfirinima, čiji je najjednostavniji predstavnik, porfin, sastavni dio klorofila i hemoglobina. Vitamin B<sub>12</sub> također sadrži četiri hidrogenirana pirolna prstena.

**Benzofuran** (kumaron) pojavljuje se u katranu ugljena. Pripravljaju se iz kumarina:



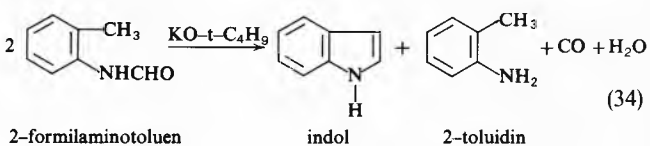
Benzofuran je kemijski manje reaktivan od furana. Podvrgava se reakcijama elektrofilne supstitucije, a supstituent ulazi isključivo u položaj 2. Adicijski produkti vrlo se lako pripravljuju. U prisutnosti klora ili broma dolazi do adicije u položaju 2 i 3. Otvaranje prstena ide teže nego kod furana, a postiže se ili ozonolizom ili reakcijom s natrijem. Benzofuran se lako reducira s vodikom dajući 2,3-dihidroderivat kumaran, koji se, budući da nema aromatski karakter, ponaša poput etera.

**Benzotiofen** je dobiven sintezom 1893, a izdvojen je iz katrana ugljena 1902. godine. Nema veću komercijalnu vrijednost. Glavni je izvor sumpornih nečistoća u tehničkom naftalenu. Benzotiofen se za razliku od benzofurana sulfonira, bromira, nitrira i acilira prema Friedel-Craftsu u položaju 3. Takva orijentacija pri elektrofilnoj supstituciji pripisuje se manjoj elektronegativnosti sumpora u usporedbi s kisikom. Industrijski se benzotiofen dobiva iz etilbenzena:



Benzotiofenski derivat tioindigo i srodni spojevi sastojci su tioindigo bojila, koja imaju komercijalnu vrijednost (v. *Bojila*, TE2, str. 106).

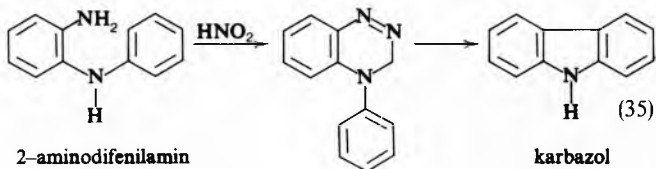
**Indol** je prvi put pripravljen 1866. godine. Indol i njegovi derivati mogu se pripraviti na nekoliko načina, npr. Madelungovom ciklizacijom:



Kemijska svojstva indola slična su svojstvima pirola uz dodatni utjecaj benzenskog prstena, koji stabilizira molekulu i upućuje elektrofilni reagens u položaj 3. Vodik u položaju 1

ima kiseli karakter i može se zamijeniti metalnim natrijem ili kalij-hidroksidom. Iz nastalih natrijevih ili kalijevih soli u reakciji s alkiljodidom nastaju 1-supstituirani alkilindoli. Kada se direktno halogenira s bromom ili jodom, dobiju se 3-halogenindoli. Indol se može djelomično katalitički hidrogenirati dajući 2,3-dihidroindol, a jače hidrogeniranje daje oktahidroindol, te na kraju, uz otvaranje prstena s dušikom, 2-etilcikloheksilamin. Prsten s dušikom može se otvoriti i u reakciji s perkiselinama ili ozonom. U prisutnosti kiseline indol polimerizira. U procesima u prirodi do cijepanja dolazi pomoću enzima. Indol se nalazi slobodan u jasmínu, cvijetu naranče itd. Indolski prsten je sastavni dio mnogih prirodnih spojeva. Tako se npr. nalazi u indikani iz kojeg se dobivao indigo, od davnine poznato bojilo (v. *Bojila*, TE2, str. 106) i u triptofanu, amino-kiselini važnoj za mnoge žive organizme (v. *Aminokiseline* TE1, str. 273). Indol se danas mnogo upotrebljava u industriji mirisa.

**Karbazol** se može izolirati iz katrana kamenog ugljena, a sintetizirati iz 2-aminodifenilamina:



Dušikov atom karbazola (kao i pirola) može se alkilirati alkil-halogenidima. Tako npr. u reakciji s acetilenom u prisutnosti natrij-hidroksida karbazol daje N-vinilkarbazol, koji se može polimerizirati u vinilni polimer. Karbazol je vrijedan polazni spoj u mnogim sintezama boja, plastičnih masa itd.

*Spojevi s jednim heteroatomom i šesteročlanim prstenom*

Najvažniji heteroaromatski spojevi s jednim heteroatomom i šesteročlanim prstenom navedeni su u tabl. 5.

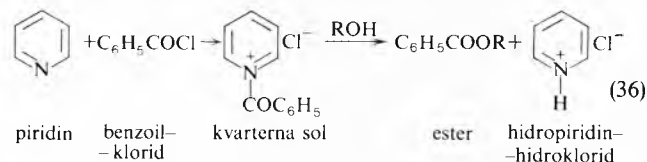
Tablica 5

VAŽNIJI HETEROAROMATSKI SPOJEVI S JEDNIM HETEROATOMOM I ŠESTEROČLANIM PRSTENOM

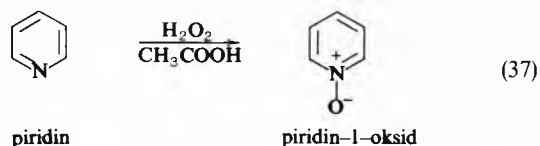
Struktura	Ime (nesistematsko)	Talište °C	Vrelište °C
	piridin	-42	115
	benzopirilijske soli		
	kinolin	-15,6	237
	izokinolin	26,5	243
	akridin	110	350
	fenantridin	108	349

**Piridin** je najvažniji šesteročlani heterociklički aromatski spoj. Otkrio ga je Anderson 1849. godine. Piridin se miješa

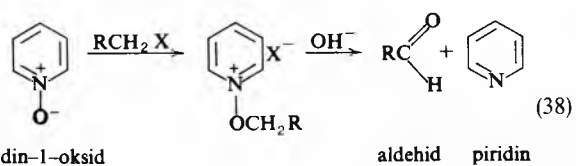
s vodom i većinom organskih otapala, a budući da posjeduje bazni karakter, često se upotrebljava kao otapalo i reaktant u brojnim organskim sintezama, u kojima se oslobađaju kiseline štetne za tok reakcije. S oslobođenim jakim kiselinama piridin tvori stabilne soli. Tako se pri aciliranju fenola, alkohola ili amina s kloridima ili anhidridima kiselina u prisustvu piridina, prvo s piridinom stvara kvarterni sol, koja zatim reagira s drugim reaktantom. Pri tome nastaje željeni esterski produkt, a piridin veže oslobođenu jaku kiselinu:



Kvarterne piridinske soli vrlo se lako s vodom raspadaju u soli i organske kiseline. Piridin se može oksidirati sa 30%-tnim vodik-peroksidom u prisutnosti octene kiseline:



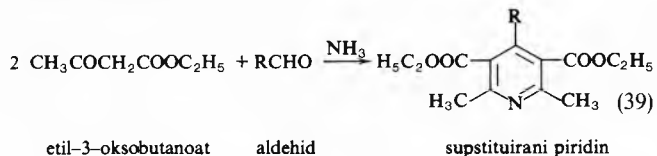
Produkt oksidacije, piridin-1-oksid, može se alkilirati s alkilhalogenidima. U hidrolizi tog produkta s lužinom nastaju aldehidi. Na taj način može se pripremiti niz aromatskih aldehida u dobrom iskorištenju:



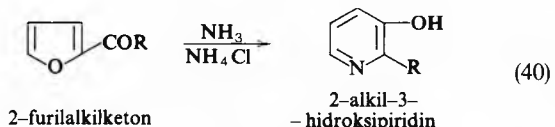
R = H, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub> itd.; X = Cl, Br, I.

Piridin se lako reducira u piperidin (heksahidropiridin). Prsten u piridinu i supstituiranim piridinima može se otvoriti pod utjecajem ultravioletnog svjetla. Žuta boja starih uzoraka piridina potječe od derivata glutakonskih aldehida koji su nastali na taj način.

Piridin i derivati piridina mogu se dobiti iz katrana kamenog ugljena, a postoji i više sintetskih načina njihovog dobivanja, koji se temelje na zatvaranju prstena (ciklizaciji) iz lančastih spojeva. Piridin se može pripremiti iz glutakonskog aldehida i amonijaka, a derivati piridina pripremaju se iz odgovarajućih aldehida ili ketona, prema (21). Na taj se način mogu pripremiti brojni supstituirani piridini. Hantzschova sinteza piridina iz  $\beta$ -ketoestera i aldehida u prisutnosti amonijaka također je izvor brojnih derivata:

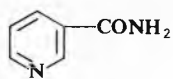


Postoje i varijacije Hantzschove sinteze, u kojima reagiraju dva mola aldehida i jedan mol  $\beta$ -ketoestera, te hidroksilamin umjesto amonijaka, itd. Derivati piridina mogu se također pripremiti iz derivata furana:

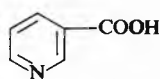


Piridin se ne nalazi slobodan u prirodi, ali se njegovi derivati pojavljuju u mnogim živim organizmima, gdje igraju važnu

ulogu. Derivati koji se najčešće susreću jesu nikotinamid i nikotinska kiselina.



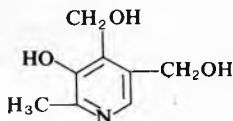
nikotinamid



nikotinska kiselina

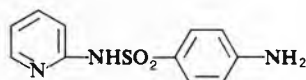
Nikotinamid je sastavni dio nekih koenzima, koji sudjeluju u oksidacijsko-redukcijskim procesima u živim organizmima. Prilikom njihove redukcije adira se vodik na piridinski prsten. Nikotinska kiselina nastaje *in vivo* iz triptofana i nakuplja se u jetri, da bi se na kraju izlučila u obliku nekih svojih derivata u ljudskom urinu.

Piridoksin, vitamin B<sub>6</sub>, jest supstituirani piridin, koji sprečava dermatitis u štakora. Piridoksin se *in vivo* mijenja u piridoksal-5-fosfat, koji sudjeluje u brojnim enzimatskim reakcijama koje uključuju aminokiseline.

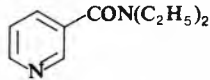


vitamin B<sub>6</sub>

Niz spojeva koji sadrže piridinsku skupinu posjeduje farmakološku aktivnost. Najpoznatiji su sulfapiridin, koji ima antibakterijska svojstva, te koramin, koji se upotrebljava kao respiratorni stimulans.

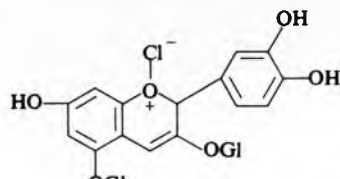


sulfapiridin

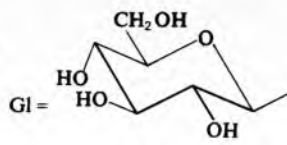


koramin

**Benzopirilijske soli.** Derivati benzopirilijskih soli često se susreću u biljkama kojima daju boju (antocijanini). Više takvih spojeva može se ekstrahirati iz latica cvjetova. Jedan od antocijanina jest npr. cijanin, koji daje crvenu boju laticama ruža.

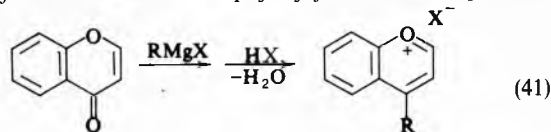


cijanin



$\beta$ -glukozil

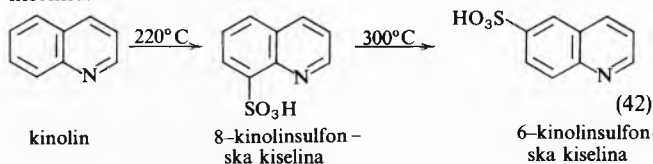
Benzopirilijske soli mogu se pripraviti iz benzo-4-pirona (kromona), čiji se derivati također pojavljuju u nekim biljkama:



benzo-4-piron

benzopirilijska sol

**Kinolin** posjeduje karakteristike slične piridinu. Bezbojan je i intenzivnog mirisa, a stajanjem požuti zbog otvaranja prstena pod utjecajem ultravioletnog svjetla. Kinolin je nešto slabija baza od piridina. Tvori mnoge soli koje su slabo topljive u vodi. U reakciji elektrofilne supstitucije daje miješane produkte pretežno supstituirane u položaju 5 i 8. U istim položajima može se i bromirati, a sulfoniranje na 220°C daje pretežno 8-sulfonsku kiselinu, koja se na 300°C pregrađuje u 6-sulfonsku kiselinu.



kinolin

8-kinolinsulfonska kiselina

6-kinolinsulfonska kiselina

Nukleofilnom supstitucijom može se dobiti produkt supstituiran pretežno u položaju 2, a ponekad i u položaju 4. Kinolin se, slično piridinu, oksidira u kinolin-1-oksid, a redukcijom s metalnim hidridima dobiva se 1,2-dihidrokinolin. Hidrogeniranjem kinolina ili 1,2-dihidrokinolina dobije se 1,2,3,4-tetrahidrokinolin:

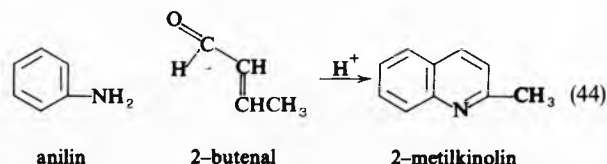


kinolin

1,2-dihidrokinolin

1,2,3,4-tetrahidrokinolin

Kinolin se nalazi u katranu kamenog uglja, a sintetski se najčešće dobiva Skraupovom sintezom, prema (22), (23). Variranjem reaktanata mogu se pripraviti različiti derivati kinolina. Döbner von Millerovom sintezom, koja je slična Skraupovoj, mogu se također sintetizirati derivati kinolina:



anilin

2-butanal

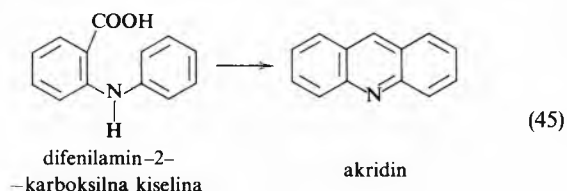
2-metilkinolin

Kinolin se kao dio veće molekule nalazi vezan u nizu alkaloida i bojila. Tako je npr. dio molekule kinina, alkaloida kojim se liječi malarija (v. *Alkaloidi*, TE1, str. 204).

**Izokinolin** je prvi put izoliran 1885. godine iz kinolinske frakcije katrana kamenog ugljena. Izoliran je također i iz sirove nafte. U reakcijama elektrofilne supstitucije zamjenjuje se vodik u položaju 5 (nitriranje i sulfoniranje), bromiranje i uvođenje žive odvija se u položaju 4, a nukleofilna supstitucija u položaju 1.

Izokinolin je nešto jača baza od kinolina i s reagensima za alkiliranje daje kvarterne soli. Kinolin se najčešće dobiva sintezom Bischler-Napieralskoga, prema (24), ali se može dobiti i dehidrogeniranjem tetrahidroizokinolina.

**Akridin** je prisutan u težim frakcijama katrana kamenog ugljena. Iritirajuće djeluje na sluznicu nosa i grla. Otopina akridina i njegovih derivata fluorescira plavo ili zeleno. Nitriranjem i bromiranjem dobiju se 2,7-disupstituirani, odnosno 2,4,5,7-tetrasupstituirani produkti (elektrofilna supstitucija). U nukleofilnoj supstituciji dolazi do zamjene u položaju 9. Akridin-10-oksid može se dobiti oksidacijom akridina s perbenzojevom kiselinom. Akridin se najčešće dobiva ciklizacijom difenilamin-2-karbonsilne kiseline:

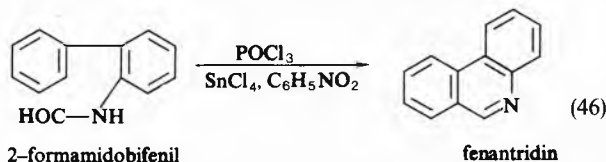


difenilamin-2-karbonsilna kiselina

akridin

Derivati akridina upotrebljavaju se kao bojila, a 9-aminoakridin-hidroklorid je antibakterijski agens.

**Fenantridin** se također nalazi u katranu kamenog ugljena. Nitriranjem daje 1- i 10-nitrofenantridine, a u reakciji s kalij-amidom dobiva se 6-aminofenantridin. Fenantridin se najčešće sintetizira ciklizacijom 2-formamidobifenila:



2-formamidobifenil

fenantridin

Neke su soli fenantridina aktivne protiv infekcije stoke parazitima tripanosomima.

## Spojevi sa dva ili više heteroatoma

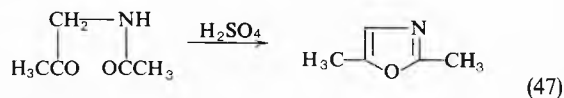
Najvažniji heterociklički spojevi, koji sadrže dva ili više heteroatoma u prstenu, navedeni su u tabl. 6. To su redovito heteroaromatski spojevi, koji mogu imati istovrsne ili raznovrsne heteroatome.

Tablica 6  
VAŽNIJI HETEROCIKLIČKI SPOJEVI SA DVA ILI VIŠE  
HETEROATOMA

Struktura	Ime (nesistematsko)	Talište °C	Vrelište °C
	oksazol		69
	izoksazol		95
	tiazol		117
	izotiazol		112
	imidazol	90	256
	pirazol	70	187
	piridazin	-8	207
	pirimidin	23	124
	pirazin	54	121
	purin	212	
	pteridin	139	
	1,3,5-triazin	86	114

Spojevi sa dva atoma kisika ili dva atoma sumpora nisu česti i nemaju preparativnu ni industrijsku važnost.

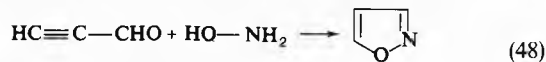
Oksazol je prvi put pripremljen 1947. godine. Slaba je baza i stabilan je prema djelovanju kiselina na nižim temperaturama. Oksazolski prsten otvara se uz prisutnost kiselina na višim temperaturama. Jedan od postupaka za dobivanje oksazola jest ciklizacija acilamidoketona:



metil-acetamidometilketon

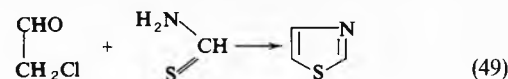
2,5-dimetiloksazol

Izoksazol je strukturni izomer oksazola i posjeduje slične karakteristike. Otporan je prema kiselinama, slaba je baza, a s alkilirajućim agensima daje kvarterne soli. Pod utjecajem lužine izoksazolski prsten se otvara. U elektrofilnoj supstitucijskoj reakciji dolazi do zamjene u položaju 4. U sintezi izoksazola upotrebljava se reaktant koji već posjeduje O—N vezu:



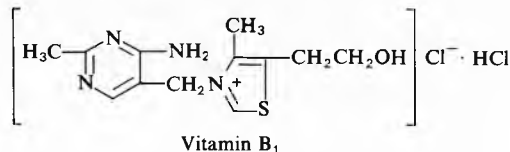
propargilaldehid    hidroksilamin    izoksazol

Tiazol, iako slabija baza od piridina, također tvori kristalinične hidrokloride. U elektrofilnoj supstituciji (npr. nitriranjem) dolazi do zamjene u položaju 5, a nukleofilnom supstitucijom (npr. pomoću  $\text{NaNH}_2$ ) dobiva se 2-supstituirani produkt. Tiazol se pripravlja Hantzschovom sintezom iz  $\alpha$ -halogeniranih aldehida:

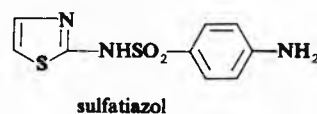


kloretanal    tioformamid    tiazol

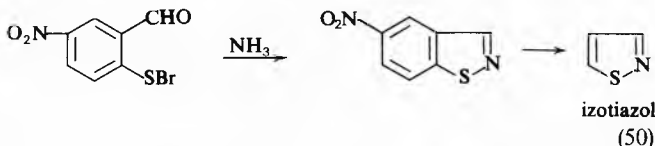
S alkilhalogenidima tiazol tvori tiazolijske soli, od kojih neke imaju važnu biološku funkciju. Poznata tiazolijska sol je vitamin B<sub>1</sub> (tiamin, aneurin). Manjak tog vitamina u čovjeku uzrokuje bolesti (beri-beri, polineuritis).



Sulfatiazol, važan antibakterijski agens, također sadrži tiazolski prsten.



Izotiazol se dobiva kompliciranom sintezom od šest stupnjeva, u kojoj se već u prvom stupnju stvara izotiazolski prsten:



Izotiazolski prsten prisutan je u molekuli saharina, koji se često upotrebljava umjesto saharoze zbog jakog slatkog okusa.

Imidazol je pripremljen prvi put 1858. godine. Pojavljuje se u dvije tautomerne forme, jer vodik može biti na bilo kojem od dušikovih atoma. Tako su npr. 4-metilimidazol i 5-metilimidazol tautomerne oblici, pa se taj spoj često naziva 4(5)-metilimidazol.

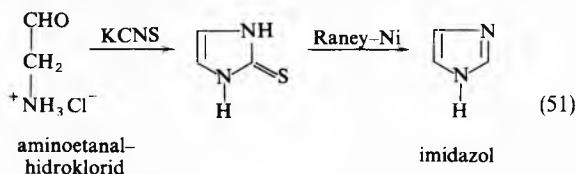


4(5)-metilimidazol

Visoko vrelište imidazola (256°C) može se objasniti njegovom sposobnošću da tvori vodikove veze. U tekućem stanju

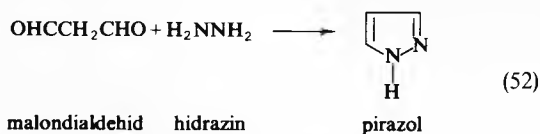


i u otopini veže se imidazol vodikovim vezama u agregate do dvadeset molekula. Imidazol je jača baza od piridina. U elektrofilnoj supstituciji (npr. nitriranjem) dolazi do zamjene na položaju 4(5), a u halogeniranju nastaju polihalogeni spojevi (2,4,5-trihalogen-derivati). Najčešća metoda dobivanja imidazola je kondenzacija  $\alpha$ -aminoaldehida s kalij-tiocijanatom:

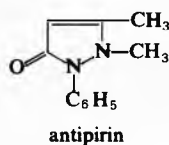


U prirodi se imidazolski prsten pojavljuje u aminokiselini histidinu (v. *Aminokiseline*, TE1, str. 273), i u spojevima, u kojima je histidin vezan, npr. u vitaminu B<sub>12</sub>, biotinu itd. Brojni derivati imidazola važni su kemoterapeutici.

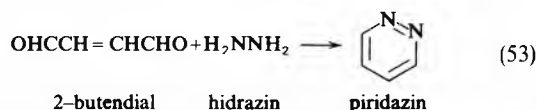
**Pirazol** se, kao i imidazol, pojavljuje u dva tautomerna oblika. Ima više vrelišta, jer vodikovim vezama tvori bimolekularne komplekse u otopini i tekućim spojevima. Elektrofilna supstitucija (halogeniranje, nitriranje, sulfuriranje) odvija se na položaju 4. Pirazol se priprema iz malondialdehida i hidrazina u prisutnosti kiselina:



Iz bilo kojeg 1,3-dikarbonilnog spoja i monosupstituiranog hidrazina moguće je pripremiti brojne derivate pirazola. Najvažniji među njima su pirazoloni koji su snažni antipiretici. Najpoznatiji je antipirin. Neki pirazoloni upotrebljavaju se kao bojila u tekstilnoj industriji.

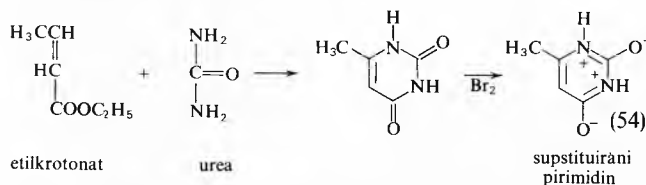


**Piridazin** je slaba baza koja tvori kristalinične soli. Nije podložan elektrofilnoj supstituciji, a priprema se slično pirazolu:



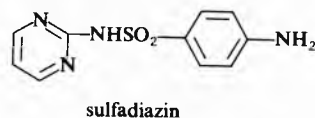
**Pirimidin** je slabija baza od piridina. Ne podliježe reakcijama elektrofilne supstitucije. Pirimidin-hidroklorid može se bromirati u položaju 5. Položaji 2, 4 i 6 podložni su nukleofilnom napadu (npr. s natrij-amidom i fenilmagnezij-halogenidom).

Postoji nekoliko načina pripreme pirimidina i derivata, prema (25). Kondenzacijom amidina ili uree s nezasićenim spojevima poput etilkrotonata mogu se također pripremiti supstituirani pirimidini:

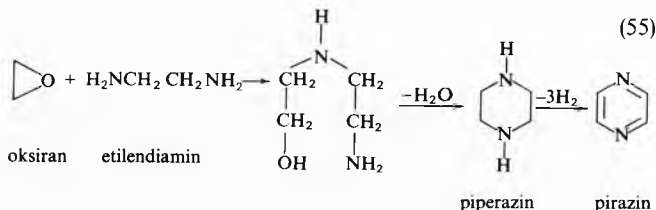


Pirimidin nije pronađen u prirodi, ali se mnogi supstituirani pirimidini pojavljuju kao dijelovi složenih cikličkih spojeva važnih za odvijanje mnogih procesa u živim organizmima. Vitamin B<sub>1</sub> i B<sub>2</sub> jesu derivati pirimidina. Neki pirimidinribozidi i deoksiribozidi (nukleozidi) pojavljuju se u obliku fosfornih estera (nukleotida) u većini živih ćelija, te izgrađuju nukleinske

kiseline, makromolekule sastavljene od nukleotida povezanih preko fosfatnih skupina. Pirimidinski prsten pojavljuje se i u farmakološki interesantnim spojevima. Derivati barbiturne kiseline (2,4,6-trihidroksipirimidin) jesu hipnotici i anestetici (Vernal, Luminal, Pentotal itd.). Kao antibakterijski agensi poznati su Sulfadiazin, Sulfamerazin i Sulfametazin.

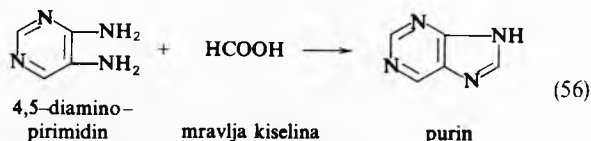


**Pirazin** je slaba baza i ne podliježe elektrofilnoj supstituciji. U reakciji s klorom na 400°C dobije se 2-klorpirazin vjerojatno mehanizmom slobodnih radikala. Nukleofilnom supstitucijom sa NH<sub>2</sub> nastaje 2-aminopirazin. Pirazin se može dobiti na nekoliko načina i u svima se kao međuprodukt pojavljuje piperazin (heksahidropirazin):

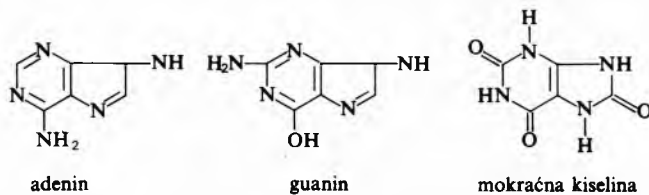


Pirazinski prsten nalazi se u mnogim prirodnim spojevima, npr. u antibiotiku aspergilnoj kiselini.

**Purin** je heterociklički aromatski spoj s priljubljenim prstenima pirimidina i imidazola. Jača je baza od pirimidina, a slabija od imidazola, jer pirimidinski prsten odvlači elektrone iz imidazolnog dijela molekule. Purin se može sintetizirati iz 4,5-diaminopirimidina i mravlje kiseline:

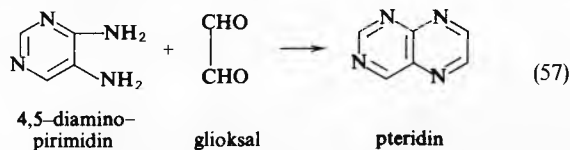


Već prema ostalim supstuentima u pirimidinu i prema izboru reaktanata (ClCOOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, H<sub>2</sub>NCONH<sub>2</sub>, itd.) mogu se dobiti različiti supstituirani purini. Hidrolizom ribonukleinske kiseline (RNA) i deoksiribonukleinske (DNA) kiseline mogu se dobiti brojni pirimidinski i purinski nukleozidi. Najčešći purini su adenin i guanin, a hidrolizom RNA dobije se nukleozid adenzin. Ti su spojevi vrlo važni u metaboličnim procesima čovjeka.



Adenin je vjerojatno najvažnija purinska baza u živim organizmima. Mokraćna kiselina izlučuje se u ljudskom urinu, a izolirana je još 1776. iz izlučina ptica. Jedan od derivata purina je i kofein, koji je glavni stimulans u čaju i kavi. Mnogi purini upotrebljavaju se kao kemoterapeutici.

**Pteridin**. Derivati pteridina izolirani su 1891. godine, ali im je struktura određena tek oko 1940. godine. Pteridin se može pripremiti iz 4,5-diaminopirimidina i gliksala:



Pteridini su žute boje i često se susreću u prirodi (npr. žuta boja pčela i osa). Neki pteridini (npr. folna kiselina i

vitamin B<sub>2</sub>) vrlo su važni za žive organizme. Pteridini su također korisni protiv određenih vrsta leukemije.

**Triazin.** Od tri moguća triazina poznat je samo 1,3,5-triazin. Triazinski prsten lako se otvara u razrijeđenoj kiselini, te daje mravlju kiselinu i amonijak. I nukleofilni napad dovodi do otvaranja prstena. U reakciji triazina s natrij-amidom dobije se natrij-cijanid i amonijak. Triazini se mogu pripraviti adicijom azida na olefine. Cijanuril-klorid (2,4,6-triklor-1,3,5-triazin) je važan u industriji boja. S amonijakom lako prelazi u melamin (2,4,6-triamino-1,3,5-triazin), koji je sastavni dio melaminformaldehidnih smola za električne izolatore. Neki supstituirani triazini upotrebljavaju se kao kemoterapeutici i insekticidi.

LIT.: R. M. Acheson, Introduction to the chemistry of heterocyclic compounds. Interscience Publishers, Inc., New York 1960. — Advances in heterocyclic chemistry, Monographies, A. R. Katritzky et al., Eds. Academic Press, New York, Vol. 1, 1963. . . . — H. M. Palmer, Heterocyclic compounds. Arnold, London 1967. — R. T. Morrison, R. N. Boyd, Organic chemistry. Allyn and Bacon, Inc., Boston 1973.

K. Humski

**HIDROAVION** (hidroplan), leteći stroj iz kategorije dinamičkih letećih strojeva (v. *Avion*, TE1, str. 562) prilagođen za polijetanje s vode, slijetanje na vodu i plovljenje po vodi. Hidroavion opremljen stajnim trapom koji omogućava polijetanje i slijetanje na tvrdo tlo naziva se amfibijom.

Razvoj hidroaviona omogućili su teoretski radovi D. Bernoullija, J. S. Russela i W. Froudea, na kojima se temelji hidrodinamika, i eksperimenti mnogih graditelja letjelica koji su veoma brzo otkrili izvjesne prednosti polijetanja s vode i slijetanje na vodu. U tome su znatan doprinos dali Francuz A. Pénaud (1871), Englez C. M. Ramus (koji je 1872. otkrio prednost stepenice na dodirnoj površini plovka s vodom), Austrijanac W. Kress (1901), Amerikanac S. P. Langley i Francuz G. Voisin, koji je 1905. godine prvi poletio s rijeke uz pomoć motornog čamca jer nije raspolagao motorom dovoljno snažnim za postizanje brzine odljepljivanja. Prvi je poletio s vode i sletio na vodu Francuz H. Fabre 1910. na jezeru Barre na hidroavionu sa tri plovka bez stepenice, koji su svojim oblikom jedno vrijeme služili kao uzor i drugim konstruktorima.

Ratne flote velikih pomorskih država počele su eksperimentirati s upotrebom hidroaviona za ratne svrhe već 1910—1911. godine, a 1912. održano je prvo natjecanje hidroaviona u Monacu. Prvi tip hidroaviona proizveden u većem broju bio je francuski leteći čamac Donnet-Lévêque iz 1913. godine (sl. 1), koji je oblikom svog hidrotupa poslužio kao uzor za gradnju većine hidroaviona koji će biti upotrijebljeni u prvome svjetskom ratu.



Sl. 1. Hidroavion Donnet-Lévêque iz 1913.

U prvome svjetskom ratu najširu primjenu našao je laki hidroavion za izvidanje. Snaga motora tih hidroaviona bila je 100—200 KS, mogli su da razviju brzinu 120—140 km/sat i mogli su ostati u zraku 4—6 sati. Engleska mornarica već u početku rata uvodi brodove nosače hidroaviona. Prvi uspješan torpedni napad izvršen je 1915. u Mramornom moru (Savezničke operacije u Dardanelima) lansiranjem torpeda s hidroaviona tipa Short 184 (sl. 2). U toku prvoga svjet-



Sl. 2. Torpedni hidroavion Short iz 1915.

skog rata hidroavion je znatno tehnički usavršen i konstruirano je mnogo tipova izviđačkih, torpednih i lovačkih hidroaviona. Znatno je porastao i njihov broj, pa su npr. na kraju rata hidroavioni sačinjavali 55% ukupne snage francuskog ratnog zrakoplovstva. To je već nagovještavalo ono što će se dogoditi u razdoblju između dva rata — da će hidroavion nadmašiti avion gotovo u svim važnijim performansama i obujmu primjene.

Jedan od razloga za takav razvoj bila je potreba za uvođenjem preko-oceanskih zračnih veza. Hidroavioni nisu zahtijevali gradnju dugačkih pista i, kako im dužina zaleta nije bila ograničena, mogli su ponijeti i 20% korisnog tereta više nego avioni. Sposobnost hidroaviona da se održe na vodi i na uzburkanom moru bila je također jedan od faktora koji su utjecali na to da se u preko-oceanskom putničkom i poštanskom prometu upotrebljavaju isključivo hidroavioni. Era velikih putničkih hidroaviona započela je gradnjom gigantskog letećeg čamca Dornier Do-X (1929. godine: sl. 3) koji je mogao ponijeti 170 putnika, a završila je gradnjom najvećeg ikad konstruiranog hidroaviona, Hughesovog Herculesa, predviđenog za 700 putnika, koji je izvršio samo jedan pokusni let 1947. godine (zbog poteškoća s materijalom za vrijeme rata izrađen je kao drvena konstrukcija).



Sl. 3. Hidroavion Dornier Do-X iz 1929.

Iako je aerodinamički otpor hidroaviona tadašnje konstrukcije bio osjetno veći od otpora aviona istih dimenzija, neograničena dužina zaleta hidroaviona i njegova mogućnost slijetanja većim brzinama (uređaji za hipertisak i smanjenje brzine slijetanja još nisu postojali) omogućavale su primjenu većih specifičnih opterećenja krila i upotrebu snažnijih motora, pa su od 1927. do 1939. godine apsolutni rekord u brzini leta držali specijalno građeni hidroavioni. U tome je posebno bilo važno takmičenje za Schneiderov pehar koji su naizmjenično osvajali Amerikanci, Italijani i Englezi na trkačkim hidroavionima tvrtki Curtiss (SAD), Macchi (Italija) i Supermarine (V. Britanija, sl. 4). Iskustva s tim letjelicama poslužila su kao osnova za stvaranje lovačkog aviona niskokrilca, koji će doživjeti svoj vrhunac u drugome svjetskom ratu.



Sl. 4. Hidroavion Supermarine S 6B (Schneiderov pehar 1931)



Sl. 5. Hidroavion SM iz 1924.