

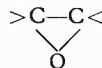
logije pred klasičnom kemijskom. U tom poslu enzimsko inženjerstvo koristi se rezultatima danas izvanredno intenzivnog istraživačkog rada na selekciji organizama-proizvođača enzima, na izolaciji enzima, njihovu prečišćavanju i imobilizaciji u oblicima pogodnim za ekonomičnu upotrebu u reaktorima. Enzimsko inženjerstvo moći će se koristiti svim tipovima reaktora poznatim u kemijskom inženjerstvu, kao miješalicama, punjenim kolonama, kolonama s fluidiziranim slojem, cijevnim reaktorima (v. *Reaktorska tehnika*). Za rekuperaciju suspendiranog katalizatora na izlazu iz miješalice radi njegove recirkulacije predviđa se najčešće ultrafiltracija (v. i *Membrane*).

Enzimsko inženjerstvo nalazi se danas tek na početku svog razvoja. Do 1973 bila su, prema literaturi, u pogonu samo dva industrijska procesa s imobiliziranim katalizatorima. U USA i Vel. Britaniji upotrijebljena je na celulozi imobilizirana penicilin-amidaza (penicilin—amidohidrolaza 3.5.1.11) da se od benzil-penicilina otcijepi acilna grupa; time dobivena 6-amino-penicilinska kiselina sirovina je za proizvodnju mnogih drugih penicilina. Više se saznalo o japanskom postrojenju za kontinuirano razdvajanje acetil-DL-aminokiselina (racemata metionina, alana, triptofana, valina i dr.) s pomoću aminoacilaze (N-acilamino-

Enzyme physics (prijevod s ruskog), New York 1969. — *W. P. Jencks*, Catalysis in chemistry and enzymology, New York 1969. — *G. J. Hajny, P. T. Reese*, Cellulases and their application, Washington 1969. — *A. Williams*, Introduction to the chemistry of enzyme action, London 1969. — *D. Desmuelle, H. Neurath, M. Olesen*, eds., Structure-function relationships of proteolytic enzymes, Munksgaard, Denmark 1970. — *D. Perlman*, ed., Advances in applied microbiology, vol. 13, New York 1970. — *D. H. Rubin*, Enzymes (industrial) — Technology assessment series, Springfield, Va 1971. — *W. T. Faith, C. E. Newbeck, E. T. Reese*, Production and application of enzymes, u djelu: *T. K. Ghose, A. Fichter*, eds., Advances in biochemical engineering, vol. 1, Berlin-Heidelberg-New York 1971. — *A. D. B. Malcolm*, Enzymes. An introduction to biological catalysis, London 1971. — *J. Brisou*, Techniques d'enzymologie bactérienne, Paris 1971. — *E. J. Beckhorn*, Enzymes, industrial production, u djelu: Encyclopedia of science and technology, vol. 5, New York 1971. — *T. M. S. Chang*, Artificial cells, Springfield, Ill. 1972. — *L. B. Wingard, Jr.*, Enzyme engineering, u djelu: *T. K. Ghose, A. Fichter, N. Blakebrough*, eds., Advances in biochemical engineering, vol. 2, Berlin-Heidelberg-New York 1972. — *L. B. Wingard, Jr.*, ed., Enzyme engineering, New York 1972. — *H. Gutfreund*, Enzymes: Physical principles, New York-Chichester 1972. — *K. M. Plowman*, Enzyme kinetics, New York 1972. — *K. J. Laidler, P. S. Bunting*, The chemical kinetics of enzyme action, Oxford 1973. — *E. Zeffren*, The study of enzyme mechanisms, New York-Chichester 1973. — *M. R. Bender, L. J. Brubacher*, Catalysis and enzyme action, New York 1973. — Enzyme nomenclature. Recommendations (1972) of the Commission on Biochemical Nomenclature on the nomenclature and classification of enzymes, together with the units and the symbols of enzyme kinetics. — Enciklopedijska i serijska djela o enzimima: — *J. B. Sumner, K. Myrback*, eds., The enzymes. Chemistry and mechanism of action, 2 vols, New York 1950/51. — *P. D. Boyer, H. Lardy, K. Myrback*, eds., The enzymes, 8 vols., New York 1959/71. — *F. D. Boyer*, ed., The enzymes, 8 vols. New York 1970/73. — *S. P. Colowick, N. O. Kaplan*, Methods in enzymology, vol. 1—32 (37 svezaka), New York 1955/74 (nastavlja se). — *F. F. Nord*, ed., Advances in enzymology and related subjects of biochemistry, vol. 4—34, New York 1944/71. — *A. Meister*, ed., Advances in enzymology, vol. 35—39, New York 1971/73 (nastavlja se). — *Hoppe-Seyler/Thierfelder*, Handbuch der physiologischen und pathologischen Analyse, Band VI (3 sveska), Berlin 1964. — *R. Weidenhagen*, Ergebnisse der Enzymforschung, Leipzig 1954.

M. Bošković R. Podhorsky

EPOKSIDI (epoksi-spojivi, epoksiderivati, oksirani), ciklički (unutrašnji) eteri koji u svojim molekulama sadrže jedan ili više heterocikličkih tročlanih oksidnih (oksidanskih) prstena:



(1)

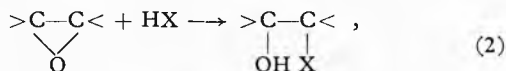
U epoksidi u širem smislu ubrajaju se ponekad i spojevi koji sadrže heterocikličke oksidne prstene sa više od 3 člana. Tako se npr. tetrahidrofuran $CH_2CH_2CH_2CH_2O$ naziva također 1,4-epoksidbutanom.

Zbog velike reaktivnosti oksiranskog prstena, epoksidi — pored toga što se kao konačni produkti upotrebljavaju za mnoge vrlo različite svrhe — predstavljaju međuprodukte za dobivanje bezbrojnih industrijskih proizvoda: plastičnih masa, sintetskih vlakana, premaznih sredstava, otapala, omeškivača, maziva, ljejkova, ljepila, detergenata, eksplozivâ i drugih tvari o kojima je riječ na drugim mjestima u ovoj enciklopediji. U ovom članku bit će od velikog broja danas poznatih epoksida opisani samo tehnički najvažniji: etilenoksid, propilenoksid, stirenoksid, tehnički važni epoksidirani esteri masnih kiselina i smjese tih estera kakve se dobivaju epoksidacijom nezasićenih masnih ulja.

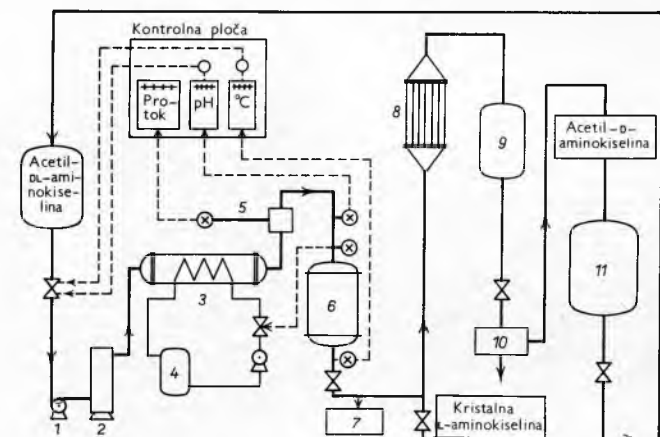
Prvi epoksid, etilenoksid, pripremio je francuski kemičar C. A. Wurtz (1859) reakcijom etilenklorhidrina s kalijumskom lužinom. Opsežnije sinteze epoksida iz olefinâ s pomoću peroksidbenzojeve kiseline objavio je N. Perleschajev (1909). Još dugo nakon toga, te i analogne sinteze upotrebljavale su se samo u preparativnoj i analitičkoj kemiji. Zanimanje industrije za tu skupinu spojeva uspjeli su pobuditi tek D. Swern i suradnici svojim radovima krajem četrdesetih godina.

Svojstva epoksida. Epoksidi su općenito tekućine s vonjem etera. Oksiranski prsten u njihovim molekulama povisuje im vrelišta u usporedbi s vrelištima odgovarajućih im etera i ugljikovodika. Iz istog razloga je i topljivost epoksida u vodi i polarnim otapalima veća.

Najznačajnije kemijsko svojstvo epoksida jest veliki afinitet oksiranskog prstena prema spojevima s pokretljivim atomom vodika u molekuli. Pri tome se općenito otvara prsten na jako polarnoj vezi između atoma ugljika i kisika. Ta se reakcija može prikazati shemom



gdje HX može biti voda, kiselina, neki alkohol, amin itd. Mehanizam ovih reakcija je ionski, bez obzira na to da li se radi o neutralnoj, kiseloj ili baznoj sredini (iznimku pri tome možda čine jedino reakcije katalitičke hidrogenacije). Reakcije (2) obično se obavljaju u polarnim otapalima (neke se u odsutnosti otapala uopće ne odvijaju).



Sl. 13. Tehnološka shema postupka za dobivanje fiziološki aktivne aminokiseline iz racemata. 1 Pumpa, 2 filter, 3 izmenjivač topline, 4 tank za toplu vodu, 5 mjerilo protoka, 6 enzimski reaktor, 7 automatski registar reakcije, 8 ispravljač, 9 kristalizator, 10 separator, 11 posuda za racemizaciju

kiseline—amidohidrolaze 3.5.1.14) imobilizirane na dietilamino-etil-Sephadexu radi proizvodnje njihovih fizioloških aktivnih L-oblika. Sl. 11 pokazuje tehnološku shemu tog postrojenja, kojemu je kapacitet 715 kg L-metionina na dan.

LIT.: *V. Henri*, Lois générales de l'action des diastases, Paris 1903. — *H. Colin, H. Belval, G. Legrand*, Oxydases et déshydratases, Paris 1947. — *J. H. Northrup, M. Kunitz, H. M. Herriott*, Crystalline enzymes, New York 1948. — *J. T. Edsall*, ed., Enzymes and enzyme systems, Cambridge, Mass. 1951. — *F. Jayle*, Les biocatalyseurs, 2 vols., Lons-le-Saunier 1952. — *K. Myrback*, Enzymatische Katalyse. Einführung in die Enzymchemie, Berlin-New York 1953. — *J. B. Sumner, G. F. Somers*, Chemistry and methods of enzymes, New York 1953. — *O. Hoffmann-Ostenhof*, Enzymologie, Wien 1954. — *W. D. McElroy, B. Glass*, eds., A symposium on the mechanism of enzyme action, Oxford 1954. — *O. H. Gaebler*, ed., Enzymes: units of biological structure and function (Henry Ford Hospital international symposium), New York 1956. — *A. H. Mehler*, Introduction to enzymology, New York 1957. — *J. B. Neilands, P. K. Stumpf*, Outlines of enzyme chemistry, New York 1958. — *K. Ichihara*, ed., Proceedings of the international symposium on enzyme chemistry, Tokyo and Kyoto 1957, New York 1958. — *R. Ammon, W. Dirscherl*, Fermente, Hormone, Vitamine und die Beziehungen dieser Wirkstoffe zueinander, Stuttgart 1959. — *F. Haurowitz*, Progress in biochemistry since 1949, Basel-New York 1959. — *H. W. Schultz*, Food enzymes, Westport, Conn. 1960. — *D. Shugar*, Enzymes and isoenzymes, New York 1960. — *O. Hayaishi*, Oxygenases, New York 1962. — *J. L. Webb*, Enzyme and metabolic inhibitors, 3 vols., New York 1963/66. — *M. Privat de Garilhe*, Les nucléases, Paris 1964. — *M. Dixon, E. C. Webb*, Enzymes, New York 1964. — *P. Boivin et al.*, Enzymologie, Paris 1964. — *A. E. Браунштейн*, ред., Ферменты, Москва 1964. — *В. А. Яковлев*, Кинетика ферментативного катализа, Москва 1965. — *H. V. Bergmeyer*, Methods in enzymatic analysis, New York 1965. — *J. B. S. Haldane*, The enzymes, Cambridge, Mass. 1965. — *G. I. de Beze*, Enzymes, industrial, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, vol. 8, New York 1965. — *G. Reed*, Enzymes in food processing, New York 1966. — *G. C. Guilbault*, Enzymatic methods in analysis, New York 1966. — *H. J. Pepler*, ed., Microbial technology, New York 1967. — *B. R. Baker*, Design of active site directed irreversible enzyme inhibitors. Organic chemistry of the enzymatic active site, New York 1967. — *H. Gutfreund*, An introduction to the study of enzymes, New York 1967. — *S. Bernhard*, The structure and function of enzymes, New York 1968. — *E. Kwanne, A. Pihl*, The regulation of enzymatic activity and allosteric interactions, New York 1968. — *T. E. Barman*, Enzyme handbook, 2 vols., Berlin-Heidelberg-New York 1969. — *M. V. Volkenshtein*,

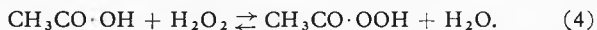
Epoksidacija. Provedenje dvostruke (alkenske, olefinske) veze >C=C< u oksiranski prsten (1) djelovanjem oksidacijskih sredstava naziva se *epoksidacijom*. Kisik se kao oksidacijsko sredstvo može upotrijebiti samo iznimno (u tehnici danas uglavnom samo za proizvodnju etilenoksida, v. dalje). Vodik-peroksid, koji se u najvećim količinama troši za epoksidaciju, sam je preslabo oksidacijsko sredstvo da bi mogao izravno oksidirati alkenusku vezu; on u proizvodnji epoksidâ djeluje redovito posredno: najprije proizvode organski peroksispojivi (po pravilu organske peroksikiseline), kojima se izvodi sama epoksidacija. Kako se pri tom regenerira tvar iz koje je dobiven peroksispoj, ta se tvar može opet oksidirati vodik-peroksidom i tako u procesu djelovati, u stvari, kao prenosilac kisika od vodik-peroksida na alkenusku vezu. Kad se epoksidacija izvodi na taj način s pomoću vodik-peroksida jednostepenim procesom, kaže se da se epoksidacija izvodi peroksispojem (organskom peroksikiselinom) proizvedenim *in situ* (lat.: na samome mjestu). Inače se epoksidacija može izvesti i peroksikiselinom proizvedenom odvojeno s pomoću vodik-peroksida u istoj tvornici ili peroksikiselinom nabavljenom izvana. U oba slučaja kaže se da se epoksidacija izvodi «pretpriredenom» peroksikiselinom. U znatno se manjem opsegu vodik-peroksid upotrebljava za epoksidaciju u zajednici s aktivatorima kao što su alkalije i neki metalni oksidi. Najčešće se upotrebljavaju alkalne otopine vodik-peroksida u metanolu, piridinu ili dioksanu. (Izgleda da u tom slučaju aktiviranje vodik-peroksida treba pripisati nastajanju perhidrosil-iona OOH⁻.) Tako se epoksidiraju, npr., nitrili i karboksilni spojevi s dvostrukom vezom u α, β-položaju:

(Pri epoksidaciji peroksikiselinama u takvim bi slučajevima nastali esteri kao neželjeni produkti.)

Metalni oksidi koji kataliziraju oksidativno djelovanje vodik-peroksida jesu osmijum-tetraoksid (OsO₄), volfram-trioksid (WO₃) i molibden-trioksid (MoO₃). Pri tome u inertnim, otapalima nastaju anorganske peroksikiseline koje su prvenstveno prikladne za hidroksiliranje olefinskih veza u vicinalne diolne skupine, ali se, pod stanovitim uvjetima, mogu upotrijebiti i za epoksidaciju. Međutim, njihova primjena u industriji nije znatna.

Najvažnije organske peroksikiseline za epoksidaciju jesu peroksiocetena i peroksimravlja kiselina.

U radu s peroksiocetnom kiselinom koja se formira *in situ* jednostavno se u reakcijsku posudu saržira tvar koja se podvrgava epoksidaciji, katalizator i mala količina ledene octene kiseline i, konačno, vodik-peroksid. U procesu najprije nastaje peroksiocetena kiselina prema jednadžbi



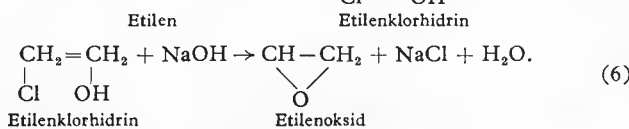
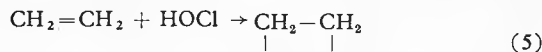
Ta kiselina zatim oksidira nezasićene veze u molekulama osnovne sirovine. Octena kiselina koja se regenerira raspadom peroksiocetene kiseline u reakciji epoksidacije ponovo stupa u reakciju (4) dok god je prisutan vodik-peroksid. Katalizator kojim se proces ubrzava jest sumporna ili polistirensulfonska kiselina. Budući da sumporna kiselina katalizira i reakciju otvaranja oksiranskog prstena, ona se u procesima epoksidacije peroksiocetnom kiselinom stvorenom *in situ* upotrebljava samo kad dobiveni epoksispojivi nisu previše osjetljivi prema takvom djelovanju sumporne kiseline. Pri upotrebi polistirensulfonske kiseline kao katalizatora može također doći do nepoželjnih sporednih reakcija u procesu epoksidacije peroksiocetnom kiselinom stvorenom *in situ* ako temperatura previše naraste, ili proces traje predugo, ili se upotrijebi veliki višak octene kiseline. Glavna prednost procesa epoksidacije peroksiocetnom kiselinom stvorenom *in situ* jest njegova sigurnost, jer pri odvojenoj proizvodnji peroksiocetene kiseline u većim količinama postoji znatna opasnost od eksplozije.

Peroksimravlja kiselina upotrebljava se kao oksidans u proizvodnji epoksida samo formirana *in situ* reakcijom analognom reakciji (4). Takvim postupkom može se koncentracija mravlje i peroksimravljene kiseline (koje mnogo jače djeluje u pravcu otva-

ranja oksiranskog prstena nego octena i peroksiocetena kiselina) održati dovoljno niska.

Druge organske kiseline skuplje su od octene i mravlje, pa se neke od njih u zajednici s vodik-peroksidom (kao peroksikiseline) upotrebljavaju samo u više ili manje specifičnim slučajevima. Tako se peroksibenzojeva, monoperoksifitalna i peroksitrifluorocetena kiselina upotrebljavaju u slučajevima kada se radi o proizvodnji epoksida vrlo sklonih otvaranju oksiranskog prstena. Osim toga neke od njih prikladne su za epoksidaciju u posebnom položaju (npr. monoperoksifitalna i peroksibenzojeva kiselina za epoksidaciju izoliranih dvostrukih veza, peroksimaleinska kiselina za epoksidaciju konjugiranih i terminalnih dvostrukih veza).

Klorhidrinski postupak dobivanja epoksida. Osim procesima izravne oksidacije (epoksidacije), epoksidi se iz alkena industrijski dobivaju i preko klorhidrina, koji se proizvede djelovanjem hipohalogenaste (npr. hipokloraste, hipokloritne) kiseline HOCl (hipohalogeniranjem) i onda prevodi u epoksid djelovanjem alkalijskog hidroksida (dehidrohalogeniranjem), npr.



Hipohalogenasta kiselina stvara se obično *in situ* otapanjem halogena u vodi, ili se dobiva iz hipohalita, npr. kalcijum-hipoklorita. Dehidrogeniranje alkilenhalogenhidrina obavlja se obično destilacijom iz alkalnih agenasa.

Postupkom dehidrogeniranja i dehidrohalogeniranja dobivaju se ponekad sterički izomeri velike reaktivnosti; taj se postupak stoga primjenjuje, među ostalim, kad se od produkta takva reaktivnost traži.

INDUSTRIJSKI VAŽNI EPOKSIDI, PROIZVODNJA I UPOTREBA

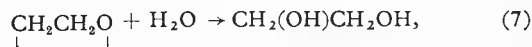
Etilenoksid

Etilenoksid, (1,2-) epoksietan, CH₂CH₂O, bezbojna je tekućina (odn. plin) karakteristična slatka mirisa; topljiv je u vodi (s kojom stvara i jedan čvrsti hidrat), t. k. 10,7 °C, t. t. -111,3 °C. Dosta je otrovan (npr. mnogo više od etilenglikola), ali njegove pare u zraku radnih prostorija nisu toliko opasne zbog otrovnosti (jer se već u malim količinama odaju svojim mirisom) koliko zbog eksplozivnosti (donja granica eksplozivnosti smjese sa zrakom je 75 g/m³). Opasan je i izravan dodir tekućine s kožom, jer se zbog naglog isparavanja stvaraju teško zalječive rane od smržavanja.

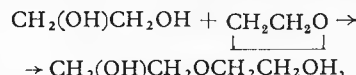
Etilenoksid je izvanredno reaktivan spoj, te je sklon i polimerizaciji. Inhibitori ove reakcije su etilenklorhidrin i etilenklorid, pa se oni upotrebljavaju kao stabilizatori etilenoksida. Već male količine taljenog natrijum-hidroksida ubrzavaju polimerizaciju etilenoksida.

Reakcije etilenoksida mogu biti toliko burne da se toplina reakcije ne može odvoditi. Tada nastupa naglo povišavanje temperature koje najčešće ima za posljedicu snažnu eksploziju (već iznad 300 °C dolazi do raspada etilenoksida uz razvijanje velikih količina plinova, uglavnom metana i ugljik-monoksida).

Etilenoksid stupa u reakciju prema jedn. (2). Tako njegova reakcija s vodom daje etilenglikol:

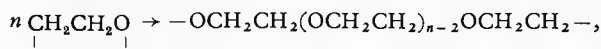


kemikaliju koja se u velikim količinama upotrebljava kao anti-friz, kao reakcijska komponenta u sintezi vlakana, umjetnih smola, lijekova, omekšivača itd. (v. *Alkoholi*, TE 1, str. 219), za proizvodnju eksploziva (v. *Eksplozivi*, TE 3, str. 533) i dr. Reakcija etilenoksida s *etilenglikolom* daje dietilenglikol:



upotrebljavan mnogo u tekstilnoj industriji. Reakcija etilenoksida s dietilenglikolom daje trietilenglikol (otapalo za smole i gume i dr.), i tako dalje sve do polietilenglikolâ koji imaju mno-

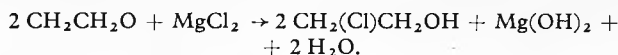
gostruku primjenu (v. *Alkoholi*, TE 3, str. 219). Kombinira li se takva reakcija stvaranja polietilenoksidnih lanaca s reakcijom polimerizacije epoksida:



može se dobiti serija etilenglikolskih derivata različite duljine lanaca i različite topljivosti u vodi.

Reakcijama između etilenoksida i *jednovalentnih alkohola* (monola) nastaju etilenglikol-monoeteri; tako reakcijom etilenoksida s etilalkoholom (etanolom) nastaje najprije etilenglikol-monoeter $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2\text{OC}_2\text{H}_5$, zatim dietilenglikol-monoeter $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OC}_2\text{H}_5$, itd. Analogno reagira etilenoksid s *organskim kiselinama*, dajući etilenglikol-monoestere. Tako dobiveni etilenglikol-diester može se izravno dobiti reakcijom etilenoksida a kiselinskim anhidridom.

Etilenoksid stupa i u veliko mnoštvo drugih, tehnički više ili manje važnih reakcija. Tako sa *sumpor-vodikom* daje oksietilmerkaptan $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2\text{SH}$ i tioglikol $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2\text{SCH}_2\text{OH}$ (v. *Sumpor*), s *acetilkloridom* acetat etilen-klorhidrina, s nekim *metalnim oksidima* u vodenoj otopini talože se (hidroksidom nastalim hidrolizom) metalni hidroksidi. Ta se posljednja reakcija iskorištava za analitičko određivanje etilenoksida:



Reakcijom etilenoksida s *amonijakom* dobivaju se etanolamini (v. *Amini*, TE 1, str. 268). Za primjenu etilenoksida i njegovih derivata u proizvodnji tenzida (detergenata) v. *Detergenti*, TE 3, str. 250. Reakcijom etilenoksida s natrijum-etilacetatom dobiva se međuprodukt za proizvodnju vitamina B i sintetskih antimarijaka.

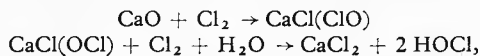
Dobivanje etilenoksida. Etilenoksid proizvodi se danas najviše direktnom oksidacijom etilena zrakom ili kisikom, manje hipohalogenacijom i dehidrohalogenacijom (klorhidrinskim postupkom).

Klorhidrinski postupak dobivanja etilenoksida uveden je u Njemačkoj (BASF i dr.) za vrijeme prvog svjetskog rata. Prvi postupak za dobivanje etilenoksida direktnom oksidacijom etilena patentiran je početkom tridesetih godina u Francuskoj (Société française de catalyse généralisée); dotjeran je do provedivosti u polutehničkom mjerilu u Njemačkoj (IG Farben) primjenom katalizatora na bazi srebra; u industrijskom mjerilu prva je 1937 počela proizvoditi po tom postupku tvornica Union Carbide Corp. u USA, koja je, prva u USA, već od 1925 proizvodila etilenoksid po postupku izravne oksidacije. U pedesetim godinama, u USA se 50...60% proizvedenog etilenoksida proizvodilo klorhidrinskim postupkom, god. 1963/64 samo 15%.

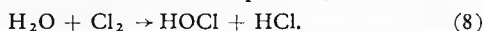
Klorhidrinski postupak proizvodnje etilenoksida ekonomički je opravdan samo kad je raspoloživ jeftini (otpadni) klor i jeftina natrijska lužina ili vapno. Osim toga, treba da bude prisutno tržište za nusproizvode, kalcijum- i natrijum-klorid, te 1,2-dikloreteran i bis(2-kloretil)eter. (Ovi posljednji znaju biti traženi kao otapala, dodaci benzinu, pesticidi i intermedijari u sintezi.)

Budući da klor danas predstavlja uglavnom deficitarnu sirovinu (v. *Elektroliza alkalijskih klorida*, TE 4, str. 416), a kisik je raspoloživ u sve većim količinama i po sve povoljnijoj cijeni, klorhidrinski će postupak možda u nedalekoj budućnosti biti u proizvodnji etilenoksida sasvim istisnut iz prakse postupcima direktne oksidacije, i pored toga što ovi traže veća investicijska ulaganja.

Etilenklorhidrin, koji je prema jedn. (6) međuprodukt pri dobivanju etilenoksida iz etilena, proizvodi se prema jedn. (5) iz etilena i hipokloraste kiseline, koja se u toku procesa proizvodi na jedan od dva načina: s pomoću vapnenog mlijeka preko kalcijum-oksiklorida $\text{CaCl}(\text{OCl})$ prema jednadžbama



ili reakcijom klora s vodom na 15...25 °C pod ~2,5 atm:



Etilenklorhidrin dobiven na jedan od ta dva načina hidrolizira se s pomoću vapnenog mlijeka ili natrijumske lužine. Etilenoksid treba ukloniti što brže iz alkalnog medija. Sl. 1 prikazuje vrlo pojednostavnjenu shemu proizvodnje etilenoksida po klorhidrinskom postupku uz međuproduktivnu hipokloraste kiseline prema jedn. (8).

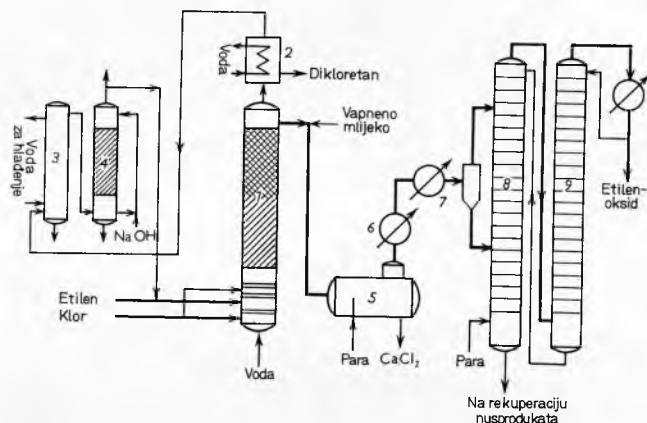
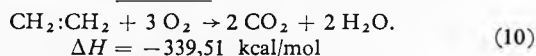
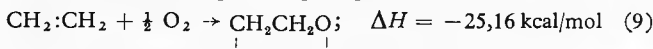
Reakcijski toranj 1 u kojemu se proizvodi klorhidrin ima u svom donjem dijelu raspršivače i porozne pregrade radi djelotvorne disperzije klora u vodi i etilena u otopini hipokloritne kiseline. Klorhidrin se brzo počinje stvarati u tom dijelu tornja i reakcija je završena u srednjem dijelu, napunjenom Raschigovim prstencima. Iz gornjeg dijela tornja ide razrijeđena otopina klorhidrina na hidrolizu, a s vrha odvođe se nereagirali plinovi (uglavnom etilen) najprije u kondenzator 2, gdje se dobiva nešto dikloreterana, a onda na čišćenje vodom i lužinom u skruberima 3 i 4, prije nego se vraćaju na dno tornja 1.

Vodena otopina klorhidrina prije ulaza u hidrolizator 5 miješa se s 10...20%-tnim viškom 10%-tnog vapnenog mlijeka. Parnim grijanjem i održavanjem malog vakuma u hidrolizatoru pare, se nastalog etilenoksida brzo uklanjaju iz reakcijske smjese. Iz njih se deflegmatom 6 uklanja voda, a prije ulaska u kolonu za rafinaciju one se ohlade hladilom 7 pri čemu se djelomično kondenziraju.

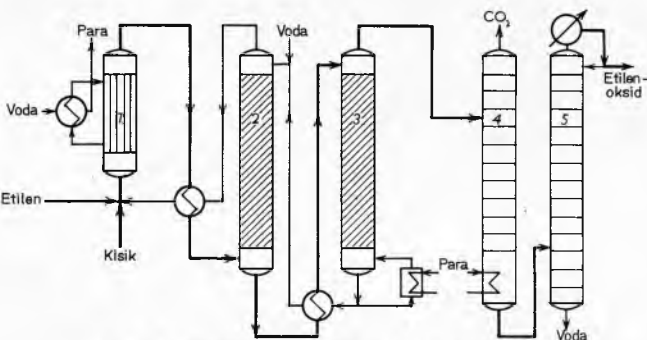
Sistem rafinacije etilenoksida sastoji se od dvije rektifikacijske kolone s tavanim (kaskadne kolone sa zvonima); u prvoj (8) se iz etilenoksida uklanjaju klorirani ugljikovodici, u drugoj (9) acetaldehid (izomer etilenoksida). Sirov etilenoksid, koji ulazi dolje u prvu kolonu, sadrži ~77,5% etilenoksida, 10% H_2O , 12% kloriranih organskih spojeva (poglavito 1,2-dikloreteran), 0,5% acetaldehida zajedno s malim količinama ugljikovodika. S vrha druge kolone izlazi 99%-tni (po molovima) etilenoksid s tragovima acetaldehida, s dna te kolone tekućina (acetaldehid s etilenoksidom) ide na vrh prve kolone. Dolje se te kolone izlaze klorirani ugljikovodici kao nusprodukt, koji se odvojeno preraduje.

Iskorištenja koja se postižu klorhidrinskim postupkom iznose oko 95% računano na klorhidrin, odn. 80% računato na etilen.

Direktna oksidacija etilena kisikom izvodi se katalitički u plinskoj fazi. Glavne reakcije pri tom postupku jesu ove:



Sl. 1. Proizvodnja etilenoksida po klorhidrinskom postupku uz međuproduktivnu hipokloraste kiseline



Sl. 2. Proizvodnja etilenoksida direktnom oksidacijom

Reakcija (10) krajnje je nepoželjna, i zbog toga što smanjuje iskorištenje, i zbog toga što se njome razvijaju velike količine topline; ali ona se ne može spriječiti. Da bi se prvenstveno odvijala reakcija (9), a u manjoj mjeri reakcija (10), mora se upotrijebiti selektivan katalizator te uskladiti i pažljivo održavati na određenoj vrijednosti veći broj među sobom zavisnih parametara: aktivnost katalizatora, koncentraciju reaktanata, temperaturu, tlak, vrijeme kontakta između reaktanata i katalizatora. Na određivanje vrijednosti tih parametara utječu, osim želje za maksimiranjem selektivnosti reakcije, također potreba minimiranja proizvodnih troškova i osiguranja bezopasnosti pogona. Ne postoji stoga samo jedan režim rada s određenim parametrima, nego se primjenjuju, prema tehničkim i ekonomskim preduvjetima, različiti režimi rada s različitim, ali među sobom usklađenim parametrima i, prema tome, u izvjesnoj mjeri i različita aparatura.

Sl. 2 prikazuje načelnu shemu proizvodnje etilenoksida direktnom oksidacijom.

Čisti etilen i zrak ili kisik poje se odvojeno u kružni tok plina koji cirkulira kroz reaktor 1 (ili više paralelno spojenih reaktora), pa kroz toranj za apsorpciju nastalog etilenoksida u vodi (2), i natrag u reaktor. Taj plin sadrži, pored nereag-

giralog etilena, poglavito dušik ako se oksidacija izvodi zrakom (uz male količine dodatog inhibitora oksidacije na CO_2), a ako se oksidacija izvodi čistim kisikom, sadrži 50% metana dodatog radi smanjenja opasnosti od eksplozije i također poboljšanja selektivnosti reakcije. Između apsorbera i reaktora cirkulirani se plin predgrijava u izmjenjivaču topline toplinom vrućeg plina što izlazi iz reaktora. Radi lakšeg odvođenja reakcijske topline s katalizatora, reaktor je cijevnog tipa, tj. sadrži velik broj okomitih cijevi napunjenih katalizatorom; kroz njih prolazi reakcijski plin u protustruji prema tekućini za hlađenje (mineralnom ulju ili drugoj tekućini visoka vrelišta) koja cirkulira kroz reaktor oplakujući kontaktne cijevi izvana. (Pri hlađenju te tekućine i kondenziranju njezinih para izvan reaktora dobivaju se znatne količine vodene pare za potrebe samog procesa i druge svrhe.)

Da bi se u reaktoru postigla selektivnost od 60% i više, konverzija etilena pri jednom prolazu kroz reaktor mora se održati na svega 30...50%. (Plin na izlazu iz reaktora može sadržati 1,2...2,0 mol% etilenoksida i 2...3 mol% etilena.) U postupku oksidacije zrakom, gdje se ionako jedan dio plina što kruži mora uklanjati da se u njemu dušik ne bi nagomilavao, oksidacija se stoga, u stvari, izvodi u dva stepena: jedan (manji) dio plina koji gore izlazi iz apsorbera 2 vodi se, nakon dodatka zraka, u reaktor(e) drugog stepena, gdje se reakcija dovršava, i stvoreni se etilenoksid apsorbera u drugom tornju za apsorpciju. Nastali apsorbat spaja se s apsorbatom iz prvog stepena, a odušni plin oslobođen etilenoksida (uglavnom dušik) pušta se s vrha tornja u atmosferu. U postupku oksidacije kisikom, nereagirali se etilen u plinu što kruži reciklira u reaktor 1. U tom se postupku mora iz plina što cirkulira uklanjati CO_2 ispiranjem vodom pod tlakom.

Etilenoksid se iz apsorpcijom dobivene otopine desorbira grijanjem i slabim vakuumom u koloni 3, a onda u kolonama 4 i 5 rafinira: u koloni 4 istjeraju se lakše isparljive primjese (CO_2 i dr.), a u koloni 5 izdvajaju se teže isparljive primjese (uglavnom H_2O) rektifikacijom.

U istoj aparaturi u kojoj se proizvodi etilenoksid može se proizvoditi i etilenglikol time što se proizvedeni etilenoksid prigodom apsorpcije i/lili rektifikacije hidrolizira. Ranije se hidroliza provodila u apsorberima i to time što se umjesto vode upotrebljavala za apsorpciju razrijeđena sumporna kiselina, danas se može proizvoditi istovremeno i etilenoksid i etilenglikol u različitim omjerima time što se rektifikacija izvodi ili pod običnim, ili pod sniženim, ili pod povišenim tlakom.

Kao selektivan i aktivan katalizator upotrebljava se i dalje srebro na pogodnom nosiocu; aktivnost katalizatora povećava se dodatkom pogodnih promotora (o tome i o pripremi katalizatora v. članak *Kataliza*). Selektivnost katalizatora povećava prisutnost antikatalizatora ili inhibitora reakcije (10), kao što su alkilhalidi, aromatski ugljikovodici, amini i organometalni spojevi. Kemijska priroda i fizičko stanje nosioca znatno utječu na aktivnost i selektivnost katalizatora (v. *Kataliza*).

Etilen kao reaktant treba da je čist (95...98% mol.), napose da ne sadrži acetilena (jer je štetan i opasan), organskog sumpora (koji truje katalizator), propilena i propana (koji se oksidiraju spremnije od etilena i to na CO_2 i vodu). Dovoljno čist etilen dobiva se danas pri krekovanju nafte, u etilenu iz kokerijskog plina treba acetilen katalitičkim hidriranjem prevesti u etilen.

Drugi reaktant, kisik, upotrebljavao se do kraja pedesetih godina isključivo kao atmosferski kisik (*oksidacija zrakom*), od šezdesetih godina sve se više uvodi *oksidacija 95%-tnim kisikom*. Prednost je oksidacije kisikom pred oksidacijom zrakom što se njome postiže veći iscrpak (~68% teorijskog prema 63...64% pri oksidaciji zrakom); što se reakcija može provesti u jednom stupnju (v. gore); što bolja vodljivost reakcijskog plina, uslijed većeg sadržaja etilena u cirkulacijskom plinu, omogućava veće presjeke kontaktnih cijevi reaktora i time veće specifične kapacitete postrojenja; što su, zbog manjeg volumena plinova, općenito dimenzije aparature manje. S druge strane, čist kisik, iako postaje sve jeftiniji, ne može biti besplatan, kao zrak, i raditi s njime opasnije je nego raditi sa zrakom. Izgleda da je za male kapacitete proizvodnje rad sa zrakom ekonomičniji nego rad s kisikom, ali za kapacitete veće od onih koji se danas smatraju minimalnim za ekonomičnost novoizgrađenih postrojenja (veće od 10 kt/god.), da se mora primijeniti postupak oksidacije kisikom.

Koncentracija etilena u plinu na ulazu u reaktor po razređenju cirkulacijskim plinom određena je granicama eksplozivnosti smjese i dopustivim gubicima etilena u nereagiranim plinovima koji se ispuštaju u atmosferu. Koncentracija kisika određena je granicama eksplozivnosti i optimalnim omjerom etilen/kisik koji ovisi, dakako, o aktivnosti katalizatora, vremenu kontakta, temperaturi i tlaku. Tipični sastav te plinske smjese bio bi, npr. (u molarnim postocima): 3...6% C_2H_4 , 5...6% O_2 , 8...10% CO_2 , ostatak inerten plin.

Temperatura u reaktoru iznosi u industrijskim postrojenjima, općenito, 250...325 °C, tlak 5...30 atm, vrijeme kontakta 1...4 s. Optimalna temperatura ovisna je o tlaku i vremenu kontakta; povećani tlak morao bi, prema jedn. (9)

pogodovati konverziji etilena u etilenoksid, ali zbog istovremene reakcije (10) taj efekt manji je od očekivanog. Međutim, povišeni tlak omogućava veću proizvodnost po jedinici volumena, poboljšanje prenosa topline, bolje izdvajanje etilenoksida iz razrijeđenog plina koji izlazi iz reaktora, smanjenje gubitaka etilena. Izbor optimalnog vremena kontakta reakcijske plinske smjese s katalizatorom uzima u obzir činjenicu da kraće vrijeme kontakta zahtijeva višu temperaturu, a dulje vrijeme kontakta pogoduje reakciji (10), što je oboje štetno.

Proces direktne oksidacije etilena na etilenoksid vrlo je osjetljiv prema odstupanjima od propisanog režima. Naročito je važno da se sprečava pregrijavanje reaktora, jer ono uzrokuje taljenje katalizatora i time smanjuje njegove aktivnosti, poremećuje stabilnost reakcije i smanjuje njezinu selektivnost.

Zalihe etilenoksida kod proizvođača obično se čuvaju u posudama sa zaštitnom atmosferom dušika, hlađenim na -10°C . Za transport etilenoksid se ukapljuje i njime se pune različite tlačne posude (od malih čeličnih boca do velikih tlačnih rezervoara). Pri svemu tome primjenjuju se propisi za skladištenje, transport i rukovanje zapaljivim komprimiranim plinovima.

Upotreba etilenoksida. Etilenoksid postao je, naročito u poslijeratnom periodu, jedan od najvažnijih proizvoda industrije alifatskih spojeva. U USA je 1963 približno 26% proizvedenog etilena upotrijebljeno za proizvodnju etilenoksida (jedino je za proizvodnju polietilena utrošeno više od toga). Gotovo sav proizvedeni etilenoksid troši se u samoj kemijskoj industriji (i to u USA 1964 oko 75% za proizvodnju etilenglikola), samo male količine upotrebljavaju se za druge svrhe, npr. kao pesticid. Prema procjenama, svjetski kapaciteti proizvodnje etilenoksida (isključivši zemlje istočnog bloka, za koje nije bilo podataka) iznosili su ~2,2 kt/god. u 1965, od toga 60% u USA. Tada se predviđalo da će u 1970 ti kapaciteti dostići razinu od 3,5 kt/g.

Propilenoksid

Propilenoksid, (1,2)-epoksiopropan, $\text{H}_3\text{C}\cdot\text{CHCH}_2\text{O}$, bezbojna je, zapaljiva tekućina, djelomično topljiva u vodi; miješa se s većinom organskih otapala; t. k. 34°C , t. t. 112°C . Pare su mu također sklone eksploziji u smjesi sa zrakom. Nešto je manje otrovan od etilenoksida pri udisanju ili kad kroz usta dospijeva u organizam i nije toliko opasan u dodiru s kožom, iako može također izazvati smrzavanje.

Budući da molekula propilenoksida sadrži asimetričan ugljik, postoje dva optička izomera tog spoja. Podaci u ovom članku odnose se na racemsku smjesu koja obično predstavlja tehnički proizvod.

Reakcije propilenoksida uglavnom su analogne reakcijama etilenoksida, s tom razlikom da reakcijama propilenoksida često nastaje smjesa više izomera. (Tako su npr. moguća tri dipropilenglikola, četiri tripropilenglikola, deset tetrapropilenglikola itd.). Propilenglikol, koji se dobiva reakcijom propilenoksida s vodom, danas je važna sirovina u proizvodnji poliesterskih smola, a polipropilenglikoli, koji nastaju reakcijom propilenoksida s propilenglikolom i njegovom polimerizacijom, služe u proizvodnji poliuretana (v. npr. *Elektrotehnički materijali*, str. 86, također *Alkoholi*, TE 1, str. 219). S alkoholima i fenolima propilenoksid (kao i etilenoksid) daje glikoletere, s amonijakom propanolamine, s organskim kiselinama glikol-monoestere, sa sumporovodikom, merkaptanima i tiofenolima merkaptopropanole i tioetere. S ugljik-dioksidom propilenoksid daje propilenkarbonat $\text{CH}_2\text{CHOCOOCH}_2$, koristan kao otapalo i reagens za sintezu.

Izvsenu tehničku važnost dobile su u posljednje vrijeme i reakcije izomerizacije propilenoksida. Tako se prema jednom u Francuskoj razvatom postupku propilenoksid u otopini katalitički (katalizator Li_3PO_4) dobrim dijelom pretvara u alilalkohol $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{OH}$. Epoksidacija alilalkohola peroksiocetnom kiselinom daje glicidol, $\text{CH}_2\text{CHOCH}_2\text{OH}$, koji hidrolizom daje glicerol (usp. *Alkoholi*, TE 1, str. 219).

Dobivanje propilenoksida. Propilenoksid se danas dobiva još gotovo isključivo iz propilena klorhidrinskim postupkom. To nije samo zbog toga što su na prijelazom proizvodnje etilenoksida od klorhidrinskog postupka na postupak direktne oksidacije postala raspoloživa (ili se mogla učiniti raspoloživima) mnoga klorhidrinska postrojenja koja su se mogla bez većih izmjena upotrijebiti za proizvodnju propilenoksida, nego u prvom redu zbog toga što pokušaji da se propilenoksid proizvede na drugi način još nisu doveli do postupka primjenljivog za masovnu proizvodnju.

Načelno se klorhidrinskim postupkom proizvodi propilenoksid sasvim jednako kao etilenoksid: ta se dva epoksida mogu proizvoditi u istoj aparaturi (v. sl. 1). U vodenju procesa glavna je razlika između proizvodnje etilenoksida i proizvodnje propilenoksida što u procesu proizvodnje propilenoksida treba u tornju / proizvoditi klorhidrin niže koncentracije (na izlazu iz tog tornja koncentracija je $\text{CH}_3\text{CHClCH}_2\text{OH}$ 3...4%, prema koncentraciji 5...7% pri proizvodnji $\text{CH}_2\text{ClCH}_2\text{OH}$), tj. treba raditi razrijeđenijim propilenom da bi se izbjeglo nepoželjno stvaranje bis-klorizopropilera $[\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_2\text{Cl})_2\text{O}$ i 1,2-diklorpropana. (Zbog toga se u istoj aparaturi dobiva, u tonama na dan, jednaka produkcija propilenoksida i etilenoksida, i pored veće molekulske težine prvoga.) Kondenzatorom 2 uklanjaju je bis-klorizopropil eter i diklorpropan; potonji se prodaje kao nusproizvod (služi uglavnom kao otapalo).

Na izradi postupka za proizvodnju propilenoksida, koji ne bi imao poznate nedostatke klorhidrinskog postupka (veliki gubici klora, problem otpadnih voda i dr. v. gore), mnogo se radi i mnogi su postupci patentirani, ali nijedan nije još uspio u znatnoj mjeri zamijeniti klorhidrinski postupak. Firma Halcon u USA izradila je postupak direktne oksidacije propilena hidroperoksidom dobivenim peroksidacijom ugljikovodika; prva tvornica, kapaciteta 72 kt propilenoksida, koja bi radila po tom postupku trebala je ići u pogon 1968.

Upotreba propilenoksida. Propilenoksid je postao jedna od važnijih organskih sintetskih kemikalija prvenstveno zahvaljujući velikom porastu proizvodnje poliuretana i polieterskih smola, za koje on predstavlja sirovinu.

U malim količinama upotrebljava se kao sirovina za druge sinteze, kao otapalo za celulozni nitrat i acetate, ljepila, smole i dr., kao sastojak pesticida, rashladnih tekućina, sredstava za uništavanje korova, za dezinfekciju i sterilizaciju.

God. 1967 iznosili su u USA kapaciteti za proizvodnju propilenoksida ~400 kt/god. i predviđao se porast na ~670 kt do 1975.

Stirenoksid

Stirenoksid, feniletilenoksid, fenilepoksietan, (1,2-)epoksidtilbenzen, feniloksiran, $\text{C}_6\text{H}_5\text{CHCH}_2\text{O}$ tekućina je t. k.

194,1 °C, t. t. -36,8 °C, potpuno topljiva u ugljikovodicima i njihovim kloriranim derivatima, nižim eterima i alkoholima. Reagira analogno etilen- i propilenoksidu. Dobiva se klorhidrinskim postupkom i epoksidacijom stirena peroksibenzojevom kiselinom. Njegova tehnička važnost uvjetovana je njegovom velikom reaktivnošću. Tako se polikondenzira s fenolom (usp. *Elektrotehnički materijali*, str. 86 i dalje) dajući smole koje se zbog svoje otpornosti prema vodi upotrebljavaju u industriji lakova; polimerizat stirenoksida služi kao epoksidno ljepilo postojano u vodi (v. *Ljepila*).

Epoksidirane masne kiseline i njihovi esteri

Epoksidirana prirodna ulja, napose sojino i drveno ulje, služe u preradi polivinilklorida kao omekšivači koji (uslijed toga što vrlo brzo reagiraju s klorom nastalim raspadom polivinilklorida) djeluju i kao stabilizatori. Za te se svrhe proizvode u velikom mjerilu epoksidacijom prirodnih ulja perioksioctenom kiselinom stvorenim *in situ* (v. str. 346). Reakcija se odvija u heterogenoj smjesi vodene faze (koja sadrži peroksiotenu kiselinu) i uljne faze, na malo povišenoj temperaturi (50...60 °C). Kao katalizator pokazala se vrlo pogodnim (umjesto sumporne kiseline) čvrsta polistirensulfonska smola. Sadržaj epoksidnog kisika u proizvodu ovisi, dakako, o sadržaju dvostrukih veza u ulju; u epoksidiranom sojinom ulju (koji je količinski najvažniji takav proizvod) taj sadržaj iznosi 6,4...7,1%.

Kao omekšivači za polivinilklorid upotrebljavaju se i drugi esteri epoksidiranih masnih kiselina, kao metil-, butil- i heksil-oksistearati i alilesteri masnih kiselina dobivenih iz ulja sjemenki soje i pamučike. Po upotrebnim svojstvima i tehničkim karakteristikama ti se omekšivači ne razlikuju znatno od epoksidiranih ulja.

Epoksidne smole

Danas se mogu razlikovati dvije važne grupe epoksidnih smola: jedno su smole koje se dobivaju djelovanjem epiklorhidrina na spojeve sa bar dva aktivna vodika u molekuli (glicidni derivati), a drugo smole koje se dobivaju epoksidiranjem cikloalfatskih spojeva (cikloalfatske epoksidne smole). Više o tome v. u člancima *Elektrotehnički materijali*, str. 86, i *Poliplasti i umjetne smole*.

LIT.: A. M. Paquin, Epoxyverbindungen und Epoxyharze, Berlin-Heidelberg-New York 1958. — A. Rossowsky, Epoxydes, New York 1965. — A. Weissberger, Heterocyclic compounds with three- and four- membered rings, New York 1964. — J. G. Wallace, Epoxidation i M. Lapkin, Epoxydes u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, New York 1965. — C. May, Y. Tanaka, Epoxy resins: chemistry and technology, Maidenhead, Berksh. 1973.

Ž. Viličić

ERGONOMIJA, interdisciplinarno znanstveno područje u kojem se proučavaju načini optimalnog usklađivanja odnosa prilikom rada, između čovjeka, radnog mjesta i uvjeta rada, s ciljem da se humanizira rad. Naziv je stvoren prema grč. ἔργον, ergon, rad i νόμος, nomos, zakon, red.

Rješavanje problema koji se postavljaju ergonomiji zahtijeva rad raznovrsnih stručnjaka — psihologa, fiziologa, medicinara rada, antropologa, biomehaničara, pa zatim inženjera konstruktora i onih koji oblikuju proizvode, inženjera koji projektiraju tehnološki proces i koji se bave organizacijom i studijem rada, kao i onih koji se bave sigurnošću pri radu. Karakteristika je ergonomije da nijedno znanstveno područje nije u njoj u cijelosti zastupljeno i nema prednosti pred drugima; u ergonomiji svaki stručnjak mora prilikom rješavanja problema iz svoje struke, svakako uzeti u obzir interakciono djelovanje ostalih disciplina.

Iako se ergonomija pod tim nazivom počela razvijati tek unatrag dvadesetak godina, njeni današnji principi, kao i nužnost usklađenja odnosa između čovjeka i rada, bili su poznati već i u antičko doba. Već je stariom Grcima bilo poznato da se maksimalni učinak postiže posebnim metodama i određenim ritmom rada, i to osobito pri teškim i monotonim radovima. Tako se ritam rada određivao zvučnim signalima, glazbenim instrumentima ili pjesmom. Time se povećavala proizvodnja te smanjivao gubitak i zamor.

U našoj je eri već Leonardo da Vinci (1452—1519) znao da čovjeku koji obavlja neki posao treba omogućiti da u toku rada predahne, pa je uzimao te predahne u obzir pri određivanju vremena potrebnog za neki rad. G. Galilei (1564—1642) tumačio je da zamor mišića nastaje zbog nošenja i gibanja kostiju. Francuski vojni inženjer S. Vauban (1633—1707) računao je dnevni učinak radnika tako da je uzimao u obzir i odmore u toku rada. Fizičar C. Coulomb (1736—1806) definirao je rad čovjeka kao umnožak vlastite težine i visine, odnosno puta, koji je čovjek prešao. Fizičar i kemičar A. Lavoisier (1743—94) pronašao je da je moguće kao fiziološko mjerilo za količinu ljudskog rada uzeti kvocijent između količina udisanog i izdisanog zraka.

U razvoju industrijalizacije morao se rješavati niz problema tehničke naravi, ali i probleme organizacije rada i razvoja proizvodnje. U tom nastojanju najčešće su se tražila jednostavna rješenja kako bi se povećala proizvodnja ne brinući se mnogo za čovjeka. No, analizirajući činioce koji utječu na proizvodnju, uvidjelo se da se radni učinak ne može povećati samo maksimalnim naprezanjem radnika, već da se mora uskladiti složeni sustav čovjek-stroj-uvjeti rada.

Naročito se u području organizacije rada došlo do spoznaje da će rad dobro napredovati samo ako se uz poboljšanje metoda rada i uvođenje novih strojeva, naprava i alata poboljšaju i uvjeti rada, te ako se strejevi, alati, uređaji, radna mjesta i naprave te okolina u kojoj se posao obavlja prilagode čovjeku. Postalo je jasno da je pogrešno, a i nekorisno, tražiti povećanje učinka i proizvodnje a da se pri tome ne misli na ograničene radne mogućnosti čovjeka i njegov udio u tom radu.

Istraživanja ovih problema postala su posebno intenzivna polovicom ovog stoljeća, od kada se i ergonomija oblikuje kao znanstvena disciplina. Prva društva koja okupljaju stručnjake različitih znanstvenih disciplina, a koji rade na izučavanju i rješavanju problema ergonomije, osnovana su 1950 u Engleskoj — «Ergonomics Research Society» i u SAD «Human Factors Society». U Jugoslaviji postoji «Jugoslavensko društvo za ergonomiju» osnovano 1973, te «Društvo za ergonomiju SR Hrvatske» i «Društvo za ergonomiju SR Srbije» osnovana 1974. Nacionalna društva udružena su u «International Ergonomics Association» (IEA), koje je osnovano 1959 godine.

Primjena ergonomije. Iako se ergonomija kao znanstvena disciplina može primijeniti prilikom svakog izvođenja rada, a to znači i pri svim aktivnostima u svakodnevnom životu, glavna je njena primjena tamo gdje se radi pretežni dio dana, a to znači u bilo kojoj vrsti proizvodnje. Ako se želi oblikovati radno mjesto radi optimalnog učinka, moraju se u tom sustavu čovjek-radno mjesto-uvjeti rada uskladiti: *tehnologija* koja određuje šta i kako s kojim materijalom treba nešto uraditi; *tehnik* koja daje stroj, odnosno radno mjesto, alate, naprave ili uređaje kojima ili na kojima se radi; *ergonomija* koja uzima u obzir čovjeka, njegove mogućnosti i sposobnosti, kao i granice u kojima se neki zahtjev može postaviti na čovjeka, a da pri tome ne strada njegovo tjelesno i mentalno zdravlje, da bude zadovoljan i da se na radu dobro osjeća; *organizacija* koja to sve povezuje u jedan cjeloviti sustav, pazeći na interakcije pojedinih elemenata tog sustava.

Za usklađivanje tih odnosa radi humanizacije rada, potrebno je da se poznaje čovjek i njegove mogućnosti u izvršavanju rada, uskladi *radno mjesto i metode rada* s mogućnostima čovjeka i osiguraju normalni *uvjeti rada* te onemogućiti njegov negativan utjecaj na čovjeka.

Čovjek. Svaki čovjek za sebe je sustav koji ima svoje točno određene zakonitosti i s time u vezi sposobnosti za izvođenje nekog posla, ali i granice do kojih se može opteretiti, a da to za njega ne postane štetno. Zato se moraju poznati anatomski i