

O PROIZVODNJI ALUMINIJA

Aluminij je treći element po rasprostranjenosti u Zemljinoj kori (7,3 %) i tek je 1808. godine utvrđeno njegovo postojanje. Nalazi se samo u krutim spojevima s drugim materijalima (silikatima i oksidima). Ključni događaji na njegovom putu do današnje tehnološke faze i upotrebe, bili su:

- Engleski kemičar Sir Humphrey Davy 1808. godine ustanovio je postojanje aluminija i dao mu ime.
- U Njemačkoj godine 1845. Friedrich Wöhler ustanovio je mnoga od aluminijevih svojstava.
- Godine 1854. Francuz Henry Sainte-Clare Deville razvio je redukcijski proces upotrebom natrija, koji je, uz daljnju rafinaciju, omogućio proizvodnju skupog aluminija u ograničenim količinama. Taj se proces kopirao po cijeloj Europi i predstavljao je važan korak prema industrijskoj uporabi aluminija. U Sjedinjenim američkim državama 1885. godine Hamilton Y. Cassner unapređuje Deville-ov proces i ostvaruje godišnju proizvodnju od 15 tona.
- Dva do tada nepoznata mlada znanstvenika, Paul Héroult (Francuska) i Charles Hall (USA), radeći odvojeno i ne znajući jedan za drugoga, godine 1886. istovremeno pronalaze novi elektrolitički proces, koji je i danas temelj za svu proizvodnju aluminija: **ako se aluminijev oksid (glinica) otopi u kupki od rastaljenog kriolita kroz koju teče istosmjerna električna struja, tada će se aluminij taložiti na dnu kupke.**

Osnovno o tehnologiji proizvodnje aluminija



Paul Héroult

Martin Hall

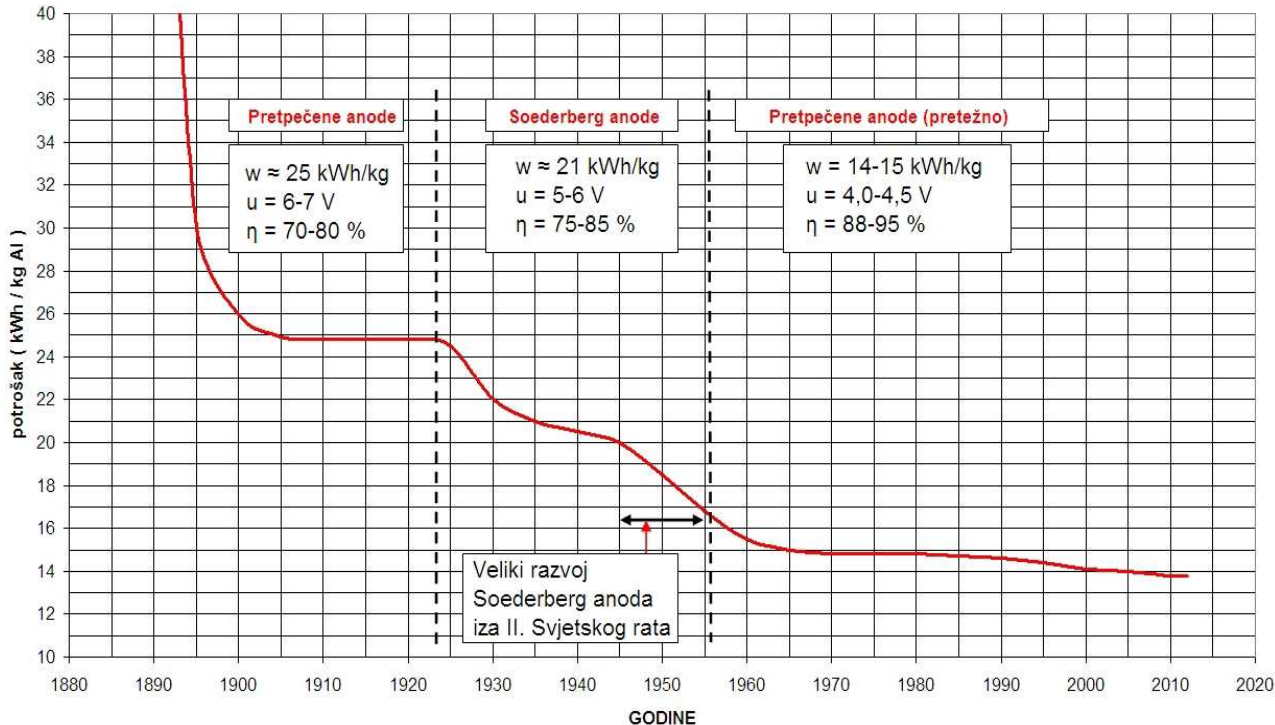
Komercijalna proizvodnja aluminija traje tek nešto više od 100 godina, dok čovječanstvo upotrebljava bakar, olovo i kositar već tisućama godina. Pa ipak, danas se u svijetu godišnje proizvede više aluminija (oko 35 milijuna tona primarnog i oko 10 milijuna tona sekundarnog, recikliranog) nego svih obojenih metala zajedno. U Hall-Héroult-ovom procesu aluminij se proizvodi elektrolitičkom redukcijom glinice (Al_2O_3) otopljene u kupki temeljenoj na rastaljenom kriolitu (Na_3AlF_6). Metal se taloži na dnu ugljenog korita i s njim tvori katodu

ćelije, dok se kisik izbija na ugljenoj anodi ćelije, reagirajući s njom i trošeći je, da bi

tvorio ugljični dioksid. Općenito je usuglašeno mišljenje da se rastaljeni kriolit potpuno disocira na ione natrija (Na^+) i na ione AlF_6^{3-} . Glinica, otapanjem u kupki od kriolita, formira različite aluminijske oksid-fluoridne ione, koji se prenose na pozitivnu anodu (koju izgaraju) i kao anodni plin izlaze iz ćelije. Anodni plin sadrži, između ostalih, i emisije fluorida iz kupke, pa se odvodi u sustav za čišćenje plinova, prije nego što bude izbačen u atmosferu. Povećanje znanja o kemijskim i elektrokemijskim procesima koji se odvijaju u tvornicama aluminija, bilo je omogućeno promjenama koje su učinjene u kemijskom sastavu kupke. Neki su fluorida u malim i ograničenim količinama dodani u kupku s namjerom sniženja njene temperature i povišenja učinkovitosti elektrolitičkog procesa.

Aluminijski fluorid (AlF_3) je najčešći dodatak i danas praktički sve ćelije rade s jednim viškom sadržaja aluminijskog fluorida u odnosu na sadržaj istog u kriolitu. Kupka uvijek sadrži i izvjesnu količinu kalcijevog fluorida (CaF_2), koji uglavnom potječe od kalcijevog oksida (CaO), koji se nalazi kao nečistoća u doziranoj glinici, ali se također u nekim slučajevima kalcijevski fluorid hotimično dodaje u kupku. Prema Faradayevom zakonu elektrolize, jedan faradej elektriciteta (26,8 Ah) bi trebao teorijski proizvesti jedan gram-ekvivalent aluminija (9,0 g). Međutim, u praksi se obično proizvede između 85 i 95 % od te količine metala. Glavni gubitak u iskorištenju struje je uzrokovan reoksidacijom aluminija s ugljičnim dioksidom.

RAZVOJ SPECIFIČNOG POTROŠKA ISTOSMJERNE ELEKTRIČNE ENERGIJE



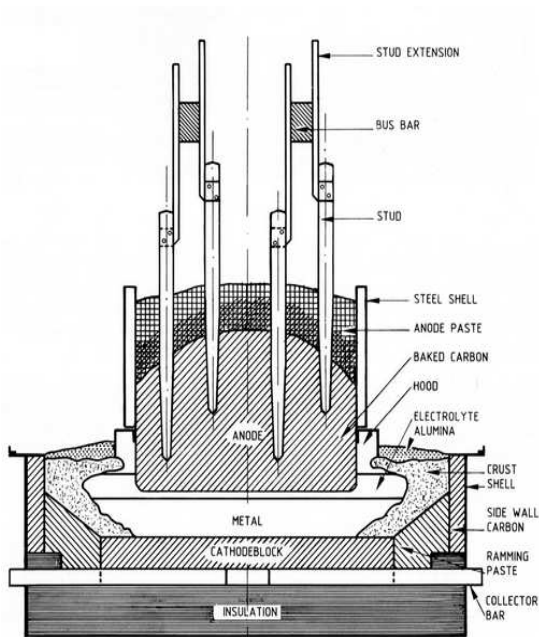
Razvoj tehnološkog postupka išao je putem usavršavanja konstrukcije ćelije, mehaniziranjem i automatiziranjem pojedinih radnih operacija posluživanja ćelija, računalnim upravljanjem pojedinih tehnoloških parametara, te osuvremenjivanjem organizacije rada. Usavršavanje Hall-Heroult-ovog postupka najviše se odražavalo na razvoj (sniženje) specifičnog potroška električne energije po jedinici proizvedenog aluminija, pa se zato razvoj tog postupka može kvantificirati upravo prikazom razvoja tog potroška energije.

Prva tvornica aluminija izgrađena od P. Heroult-a 1889. godine u Froges-u (Francuska) imala je ćelije veličine od svega 1.000 A, u kojima se ostvarivao potrošak energije od čak 100 kWh/kg Al. Tri godine kasnije već su ugrađene ćelije od 4.000 A, koje su uz srednji napon od 8 V ostvarivale potrošak energije od 40 kWh/kg, a 1898. godine u radu su ćelije od 9.000 A sa 6 V po ćeliji i uz potrošak energije od 25 kWh/kg Al. Od tada pa sve do 1924. godine nije ostvaren skoro nikakav napredak u razvoju Hall-Heroult-ovog postupka.

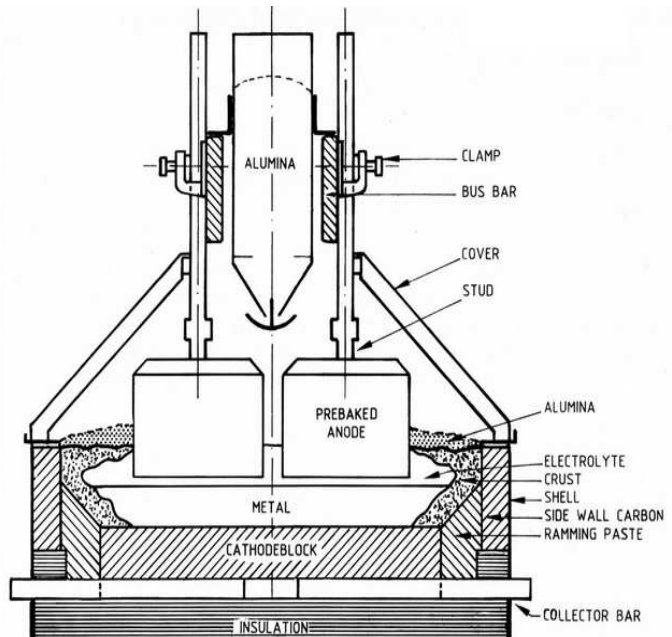
Te 1924. godine u Norveškoj se ugrađuju prve ćelije sa Söderberg kontinuiranom anodom, čija je dominacija nad dotadašnjim ćelijama s pretpečenim anodama trajala više od 30 godina. Söderberg ćelije su tada predstavljale veliki tehnički napredak, pa se je u njima oko 1930. godine ostvarivao specifični potrošak energije iznosa 20-21 kWh/kg Al uz napon ćelije od 5-6 V. Ove su ćelije nakon II. svjetskog rata doživjele veoma intenzivnu industrijsku primjenu, a 1955. godine konstruirane su Söderberg ćelije reda veličine 100.000 A, pa je tada izgledalo, da će ovaj tip ćelije potpuno nadvladati u svijetu.

Međutim, danas su Söderberg ćelije definitivno izgubile utakmicu sa svojim prethodnim takmacom, tj. sa ćelijama s pretpečenim anodama i to zbog toga što su ove potonje mnogo prilagodljivije na prodiruće procese regulacije i automatizacije, što imaju niži napon za oko 0,35 V, te što su "sklonije" skladnom egzistiranju s okolinom. Danas suvremene ćelije s pretpečenim anodama rade s jakošću struje od preko 300.000 A uz napon ćelije od 4-4,5 V, iskorištenje struje od 95-98 % i uz potrošak istosmjerne električne energije od 13-13,5 kWh/kg Al.

Suvremena ćelija za redukciju glinice sastoji se od pravokutnog čeličnog sanduka, obično sa strana obloženog s termičko-izolacijskim vatrostalnim materijalima. Unutar toga, na dnu se nalazi obloga od pretpečenih ugljenih blokova, u koje su uklopljene čelične katodne šine za prihvatanje električne struje. Toplinska izolacija je podešena tako da se ostvaruje dobra termička ravnoteža ćelije. Bočna ugljena obloga zaštićena je od agresivnog tekućeg elektrolita skrnutom kupkom, dok je na katodnom dnu ćelije, rastaljeni aluminij u izravnom kontaktu s ugljenim blokovima.



SOEDERBERG ČELIJA



ČELIJA S PRETPEČENIM ANODAMA

38 ćelija od 600 kA u pogonu

AP Technology™

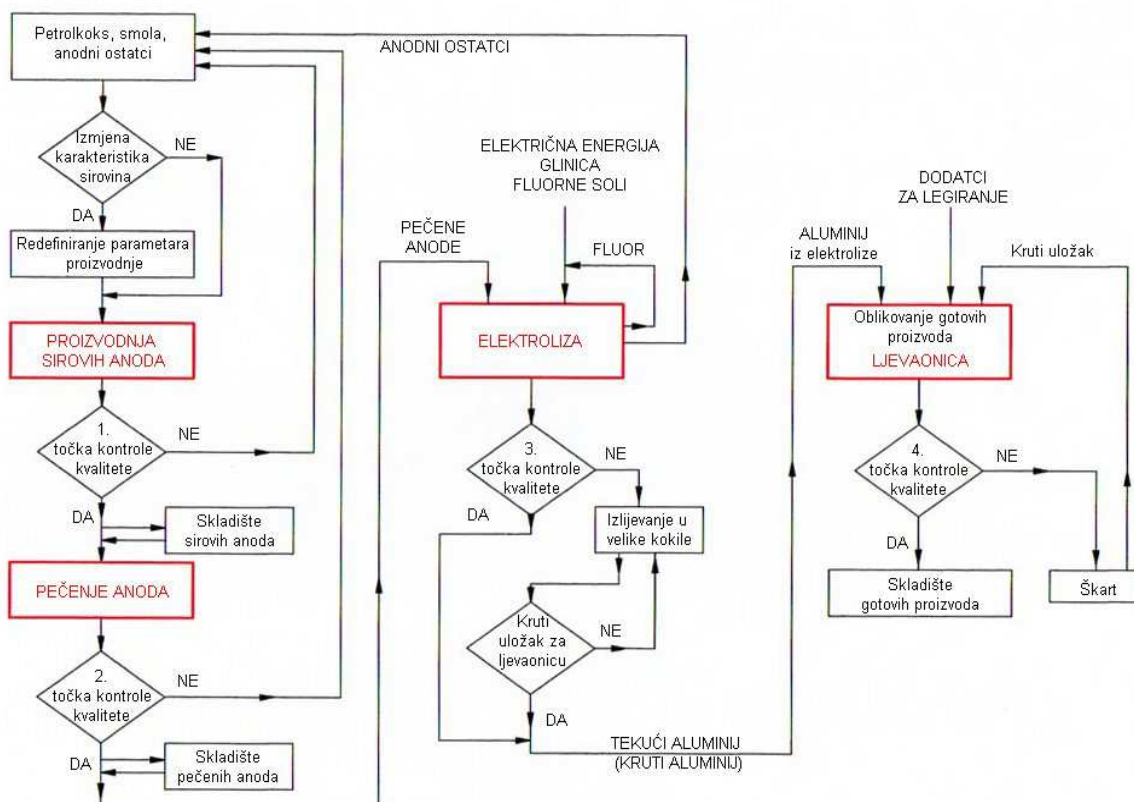
Quebec - Kanada



AP60 unsurpassed productivity
nenadmašena produktivnost

Što se tiče konstrukcije ćelije, treba reći da je ona principijelno ostala ista, onakva kako su je na samom početku razvoja koncipirali Hall i Heroult. Naravno, u praktičnoj realizaciji, pred oko 100 godina utemeljen princip, doživio je velika usavršavanja. Danas u industrijskoj praksi egzistiraju dva osnovna tipa ćelija. Jedan je tzv. Söderberg tip, koji se karakterizira jednom masivnom anodom, u kojoj se, električnom energijom i toplinskom energijom iz ćelije, dodavana sirova anodna masa (predstavlja smjesu petrolkoks i smole katrana kamenog ugljena) koksira ostvarujući monolitnu neprekidnu anodu. Söderberg tip ćelije praktički nestaje iz upotrebe, jer ne omogućava drastične izmjene u konstrukciji uvjetovane sve oštrijim zahtjevima za zaštitu radnog mjesta i čovjekovog okoliša, kao i zahtjevima za visokim stupnjem automatizacije pri vođenju tehnološkog procesa, koji bi rezultirao u povećanoj produktivnosti ćelije i u znatnom povišenju iskorištenja energije. Drugi tip ćelije, današnja moderna ćelija, je zatvorena ćelija, u kojoj se anoda sastoji od većeg broja (tipično 20, ali i više) prethodno pečenih anodnih blokova, obješenih na anodnom okviru i uronjenih u elektrolitu, koji je zajedno sa slojem proizvedenog tekućeg aluminija smješten u katodnom ugljenom koritu.

DIJAGRAM TIJEKA PROCESA PROIZVODNJE ALUMINIJA



Tehnološki proces se odvija u međupolnom razmaku (tipično 4-5 cm) između donje površine anode i gornjeg nivoa sloja tekućeg aluminija. Kod ovih najmodernijih ćelija glinica se automatski dodaje sustavom točkastog doziranja. Budući da su ćelije unutar hale elektrolize međusobno spojene u seriju, istosmjerna električna struja (tipične jakosti iznad 100 kA, ali i znatno veće) vodi se između njih pomoću aluminijskih vodiča, a zatim do međupolnog razmaka (i od njega) preko vodiča od željeza odnosno ugljena, zavisno od temperature i funkcije odgovarajućeg dijela ćelije. Budući da pad napona na svakoj ćeliji iznosi 4-4,5 V, to suvremena serija ćelija može imati do oko 300 instaliranih jedinica, koje apsorbiraju raspoloživi napon ispravljačke stanice od cca 1.500 V.

Kriteriji za izbor lokacije tvornice aluminija

Proizvodnja aluminija je energetski intenzivan proces, pa je to razlog što su mnoge svjetske tvornice aluminija locirane u područjima koja imaju pristup golemim energetskim resursima (hidro-energija, prirodni plin, ugljen ili nuklearna energija). Međutim, mnoge su tvornice aluminija i znatno udaljene od izvora energije, a koja se proizvodi i isporučuje samo za njih. Kad je riječ o električnoj energiji za proizvodnju aluminija, nije važno samo osigurati potrebne količine energije, već i kvalitetu isporučene energije u smislu kontinuiranosti dobave, bez kratkotrajnih ili sezonskih redukcija, jer je proces elektrolize teško prilagodljiv na takve situacije.

Osim toga, veoma je važno sačiniti dugoročni ugovor o snabdijevanju tvornice aluminija s električnom energijom na partnerskoj osnovi. Naime, električna energija zbog svog velikog udjela u cijeni koštanja aluminija, ima karakter sirovine. Zato proizvodnja aluminija ne može podnijeti nepredviđene oscilacije cijene energije, niti nepredviđene zastoje ili promjene u napajanju s energijom. To znači, da tvornica aluminija i isporučitelj električne energije trebaju ugovoriti cijenu električne energije, koja će biti u funkciji cijene aluminija na svjetskom tržištu (LME), kao i u funkciji količina ostvarene proizvodnje aluminija u tvornici, kako bi se u uvjetima teškoća u snabdijevanju energijom, zbog više sile, oba partnera našla na istim interesnim pozicijama.

Problem snabdijevanja elektrolize aluminija s glinicom je gotovo identičan svugdje u svijetu. Kvalitetna i relativno jeftina glinica proizvodi se u velikim količinama u svijetu, uglavnom tamo gdje su velika nalazišta boksita, čija je eksploatacija i prerada jeftina. Tako je Australija glavni svjetski snabdjevač glinice. Stoga je važno, da se tvornica aluminija nalazi u blizini neke adekvatno opremljene morske luke, kako bi se snabdijevala s relativno jeftinom glinicom, kojoj niti jedna europska ne može konkurirati, bez obzira na udaljenost.

Ekološka problematika kod proizvodnje aluminijske

Ekološka svijest i znanje veoma su porasli u posljednjih pola stoljeća. U prošlom stoljeću najveća je pažnja bila fokusirana na lokalne tvornice, koje su ugrađivale različite sustave industrijskog pročišćavanja. Time su se unapređivali radni uvjeti i sama zaštita radnika unutar tvornica. U 80-tim godinama prošlog stoljeća ekološka zabrinutost je poprimila regionalne razmjere. Razvilo se i povećano zanimanje i briga, da prirodne resurse koristimo na način koji će osigurati održiv rast. Postaje atraktivno popravljavanje i recikliranje materijala umjesto njegovog odbacivanja, a u nekim slučajevima to postaje i ekonomska opcija. Politika prati razvoj ekološke svijesti, pa se predlažu zakoni, koji od proizvođača materijala i proizvoda traže povećanu odgovornost. Iz većine metalurških procesa emitiraju se razni plinovi i prašina, pa ni aluminijska industrija nije u tome iznimka. Međutim, kod proizvodnje aluminijske komponente emisija su identificirane, kao i njihovi neželjeni efekti na okolinu, pa se dobro napreduje u pronalaženju rješenja. Postoje dokazani sustavi za kontrolu plinovitih fluorida, prašine, te SO₂.

Najnovija zdravstvena istraživanja, kombinirana s razvijenim tehnološkim analizama usmjerena su na policikličke aromatske ugljiko-hidrate (PAH), koji se emitiraju u nekim dijelovima procesa u tvornicama aluminijske, pa se predlažu ugradnje dodatnih sustava, gdje je to primjenljivo. Sada sve nove tvornice aluminijske u svom sastavu imaju sustave za suho pročišćavanje anodnih plinova i povrat fluora u proces elektrolize. Da bi se održala dobra radna atmosfera i prihvatljivi klimatski uvjeti u hali elektrolize, potrebno je izvući iz hale relativno velike količine topline i dimova ispuštenih iz ćelija. Dimovi se emitiraju kao plinovi, pare, te kao tekuće kapljice i kruta prašina. Pare se kondenziraju gotovo potpuno u aerosolnu tekućinu, da bi se potom nakon hlađenja skrutnule u submikronske čestice kompleksnog sastava. Izvlačenje plinova se realizira pomoću velikih količina zraka koji se djelomično izvlači prirodnom ventilacijom preko krovnih otvora, a djelomično isisavanjem iz ćelija kroz cjevovode sustava za kontrolu plinova.

Kod suvremenih zatvorenih ćelija s točkastim doziranjem glinice, kroz otvore na krovu hala izlazi samo 1-3 % dimova, dok se sve preostale količine hvataju u sustav za pročišćavanje. Budući da se efikasnost zatvaranja ćelija stalno poboljšava, a razvijanje fluora u ćelijama se povećava, to znači da ukupna učinkovitost hvatanja plinova ovisi čak najviše od trajanja i frekvencije otvaranja poklopaca ćelije u svrhu obavljanja nekih operacija (promjena anode, lijevanje metala i dr.).

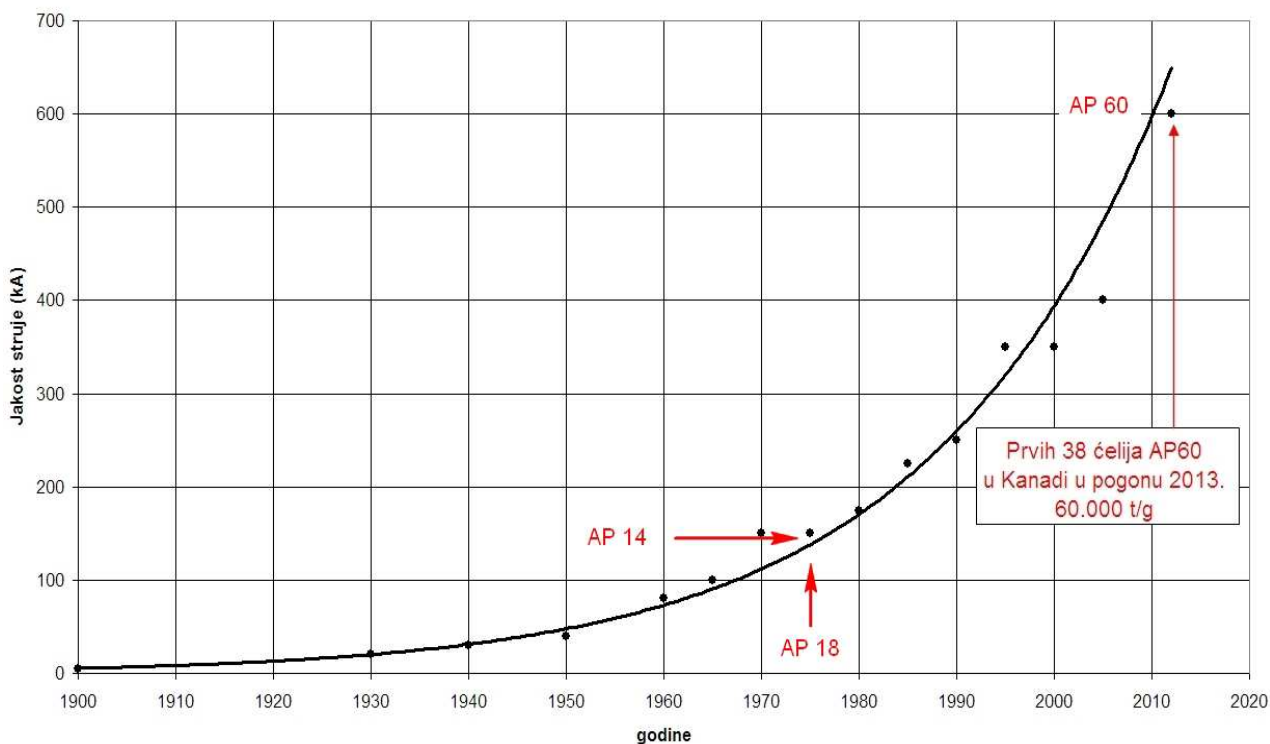
Specifična emisija fluora u okolinu kod suvremenih elektroliza spustila na svega 0,5-0,7 kg/t Al, pa je ukupna emisija bitno niža od one prije 30 godina, iako je u međuvremenu proizvodnja primarnog aluminijske porasla za 5-6 puta. Emisije ostalih plinova iz aluminijske industrije, kao npr. CO₂, CO i SO₂, imaju zanemariv utjecaj na globalnom planu, ali su mjerljivi na lokalnoj razini i u krugu tvornice. Tehnička rješenja kod novih tvornica moraju zadovoljavati postojeće standarde, ali isto tako moraju omogućavati

trajno izvođenje sitnih unapređenja primjenom budućih najboljih raspoloživih tehnologija, zvanih BAT (Best Available Technology). BAT je koncept, koji predstavlja najuspješniji alat u ovom ekološki osviještenom dobu; on se ne sviđa idealistima. Međutim, kritike moraju uzeti u obzir troškove potrebne da se nešto popravi ili izvede neka preventivna radnja, kao i posljedice po međunarodnu konkurentnost. Koncept BAT jasno zahtjeva povijesnu perspektivu kod ocjenjivanja tvorničkih performansi u nekom konkretnom vremenu: Koji je bio BAT u doba izgradnje tvornice? Možda se neka najnovija inovacija može primijeniti samo na "green field" lokaciji? Itd.

Učinkovitost proizvodnje aluminija

Koliko god je bio dramatičan razvoj obujma proizvodnje aluminija u proteklom stoljeću, isto tako je u tom razdoblju ostvaren i veliki napredak u povećanju učinkovitosti te proizvodnje. Dok je početkom prošlog stoljeća iskorištenje struje u ćelijama iznosilo oko 70 %, danas se ono kod najmodernijih ćelija ostvaruje na razini od iznad 95 %. Specifični potrošak pak električne energije opao je u istom razdoblju od oko 40 na 13 kWh/kg Al, a bruto potrošak anoda od 900 na 500 kg/t Al. No i pored navedenog, još uvijek je iskorištenje energije kod proizvodnje aluminija dosta nisko, jer teorijski utrošak za proizvodnju istog iznosi svega 6,5 kWh/kg Al.

Razvoj veličine ćelije - jakosti struje



Dodatna težnja za daljnjim unapređenjima u proizvodnji aluminijske potaknuta je konkurencijom drugih materijala i rastom potrošačkih tržišta. Taj poticaj naročito utječe na produktivnost i investicijske troškove, koji su zapravo i glavni faktori u industrijskoj proizvodnji aluminijske, a oni su bitno uvjetovani veličinom instalirane ćelije, izraženom jakošću protjecane električne struje (kA), te ukupnim kapacitetom tvornice. Krajem 70-tih godina prošlog stoljeća počela je naročito jako rasti jakost električne struje u novoinstaliranim ćelijama, uslijed upotrebe matematičkih modela pri njihovom projektiranju kao i za upravljanje tehnološkim procesom, jer je to dovelo do boljeg poimanja kemijske i fizikalne prirode elektrolitičke redukcije kod proizvodnje aluminijske.

U svjetskoj industriji aluminijske danas se ističe jedna važna specifičnost, a ta je, da prosječne vrijednosti tehnoloških pokazatelja cijele svjetske proizvodnje zaostaju gotovo 20 godina za ostvarenjima najmodernijih elektroliza. Razlog tomu je velika investicijska neodlučnost u cijeloj industriji, da se koriste najnovija tehnološka dostignuća. To proistječe iz činjenice, da smanjenje proizvodnih troškova primjenom najnovijih tehnoloških dostignuća ne može pokriti troškove kapitala potrebne za modernizaciju starih postrojenja. Zato npr., već spomenute dostignute vrijednosti iskorištenja struje (> 95 %), utroška energije (13 kWh/kg) i bruto anoda (500 kg/t), imaju svoje lošije pandane u prosječnim vrijednostima cijele svjetske produkcije: iskorištenje struje - oko 90%, utrošak energije - 14,5-15 kWh/kg, te utrošak bruto anoda - oko 550 kg/t. Isto je stanje i s veličinom elektrolitičkih ćelija, odnosno s njihovom jakošću struje.

Dok veličina najnovijih ćelija prelazi jakost struje od 300 kA, pa čak već dostiže i do 600 kA, dotle se svjetski prosjek jedva kreće oko 200 kA. Iz navedenog je jasno, da u svjetskoj proizvodnji aluminijske između starih i novih tvornica, postoje velike razlike u produktivnosti, koje se eventualno mogu kompenzirati jeftinijom radnom snagom i nižim troškovima energije i kapitala. U uhodanim tvornicama aluminijske Zapadnog svijeta, glinica s oko 35 - 40 % i električna energija s oko 20 - 25 % predstavljaju dvije najveće stavke u proizvodnim troškovima, iza kojih slijede anode s oko 15 - 20 %, troškovi kapitala također s 15 - 20 %, te radna snaga do 10 %.

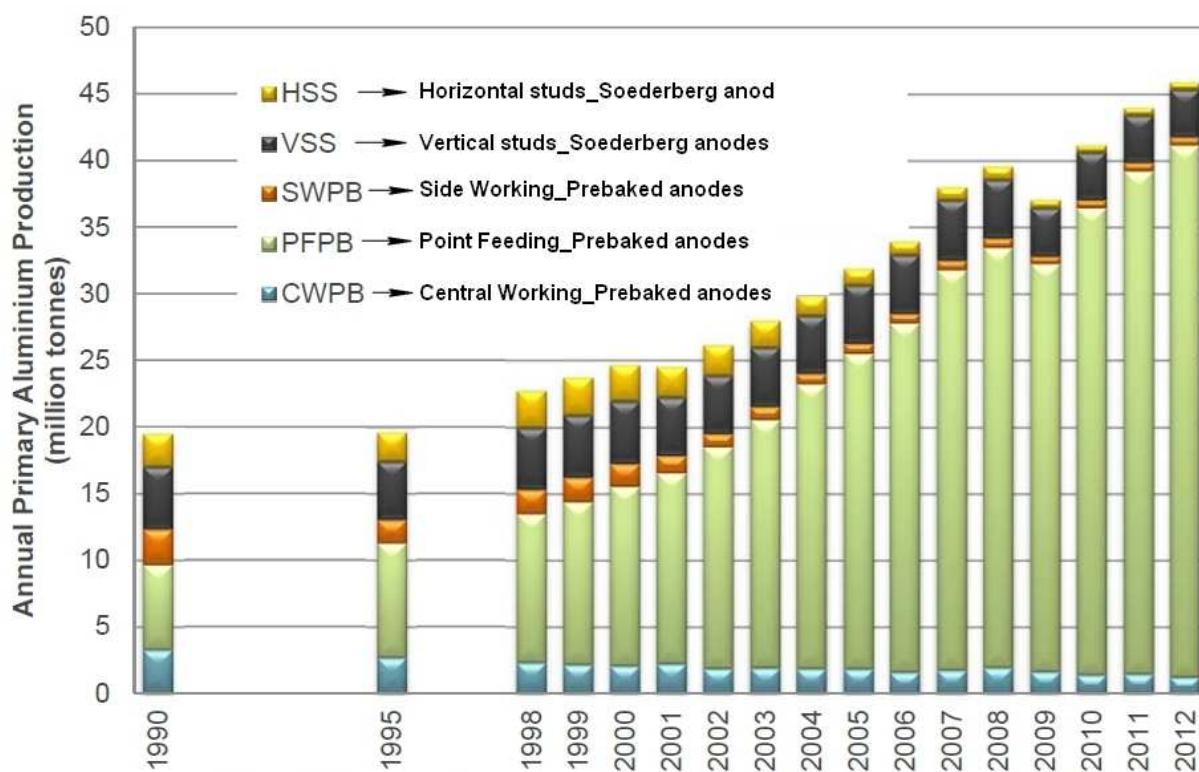
Produktivnost u tvornicama aluminijske

Budući da su mogućnosti daljnjeg istraživanja i razvoja iskorištenja struje, utroška energije i anoda kod najsuvremenijih ćelija dosta limitirane, a i razlike u tim pokazateljima između današnjih vrhunskih tehnologija su vrlo male, pa onda kao važni konkurentski faktori moderne redukcijske tehnologije ostaju još samo produktivnost i specifični investicijski troškovi. Tipične vrijednosti za produktivnost u Elektrolizama aluminijske iznose 100-400 t/čovjek godišnje. One su funkcija jakosti struje ćelije, ukupnog

broja ćelija u tvornici, te razine kompjutorizacije tehnološkog postupka. Budući da je količina rada po suvremenoj ćeliji praktički jednaka bez obzira na njenu veličinu, očigledna je prednost ugraditi ćelije što veće jakosti struje.

O konkurentnosti industrije aluminija

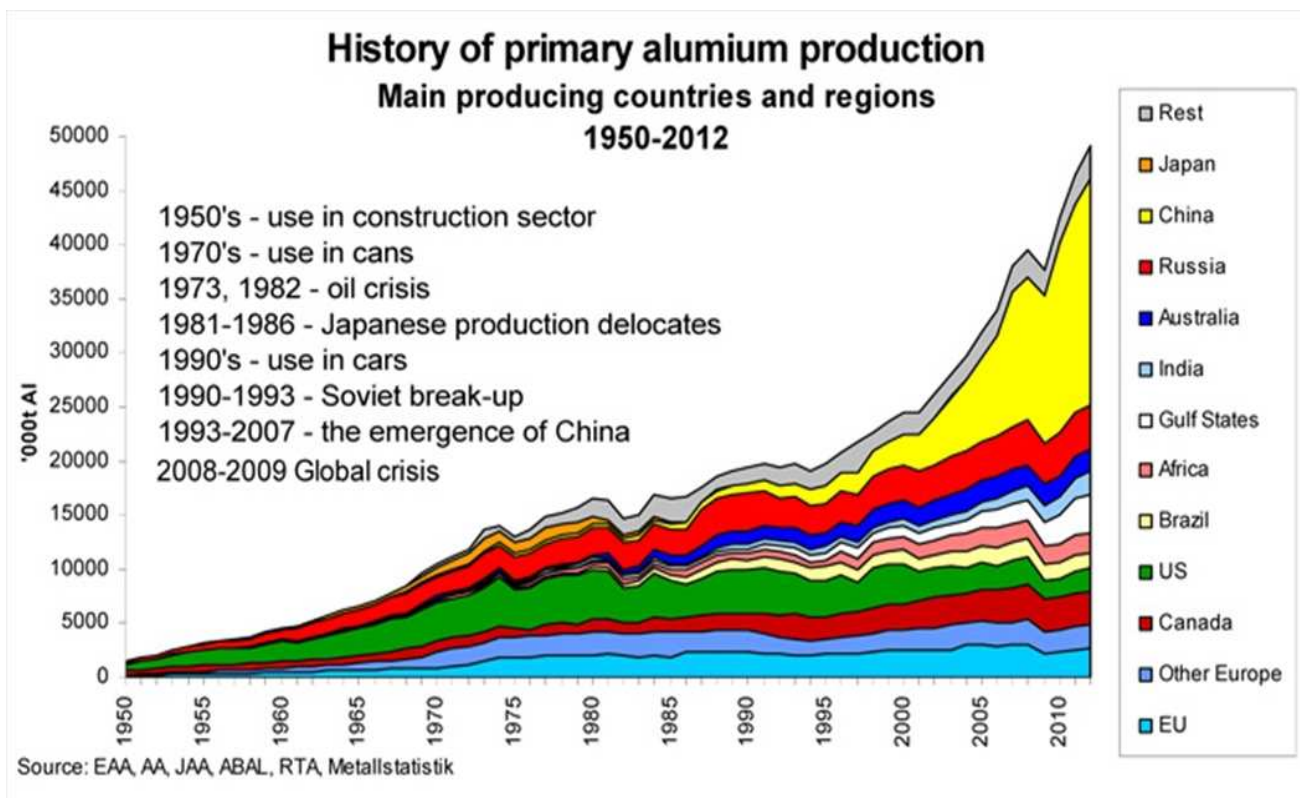
Osnovne osobine koje aluminij čine poželjnim materijalom za svakojaku primjenu su njegova specifična gustoća, čvrstoća, otpornost na koroziju, električna i toplinska vodljivost, trajnost, te mogućnost oblikovanja i reciklaže. Zahvaljujući takvim njegovim jedinstvenim odlikama, potražnja i primjena aluminija u svijetu neprestano raste, obuhvaćajući sve više novih područja primjene. Ipak, glavni konstrukcijski materijal je još uvijek čelik, čija je sadašnja godišnja proizvodnja nekoliko desetaka (cca 40) puta veća od godišnje proizvodnje aluminija.



Udio različitih tehnologija u svjetskoj proizvodnji aluminija u periodu 1990 - 2012. godine

Primary aluminium smelting technology mix, 1990-2012 (SOURCE: IAI & CRU)

Iz prednje slike je vidljivo da u proizvodnji aluminija definitivno pobjeđuje tehnologija tzv. točkastog doziranja glinice uz korištenje pretpečenih anoda, jer je ista ekonomski i ekološki prihvatljivija od ostalih, a ujedno je i prihvatljivija za daljnji razvoj automatske regulacije tehnološkog procesa.



Međutim, proizvodnja aluminiija koja je 1901. godine u cijelom svijetu iznosila ukupno svega 6.700 tona, do kraja 20. stoljeća dosegla je ukupnu godišnju proizvodnju od cca 25 milijuna tona. Ako bismo pak promotrili rast proizvodnje aluminiija u posljednjih pola stoljeća (1951.- 2000.), uočili bismo da je godišnja proizvodnja porasla gotovo 14 puta. Takav rast u tom periodu nije imala proizvodnja nijednog drugog metala. Godišnja proizvodnja čelika je u posljednjih 50 godina narasla svega oko 4 puta, a takav red veličine rasta kao čelik, imali su još bakar i cink.

U novije vrijeme Kina vrlo ubrzano razvija proizvodnju aluminiija, pa je već sada najveći svjetski proizvođač s oko 13 milijuna tona godišnje proizvodnje. Suštinska konkurentnost aluminiija svodi se na utakmicu s drugim konstrukcijskim materijalima, kao što su čelik i plastika. Ocjena o prihvatljivosti nekog od tih materijala obuhvaća njegove proizvodne troškove po jedinici težine ili jedinici volumena, te svojstva i koristi pri danoj primjeni. U novije se vrijeme uvodi i analiza životnog ciklusa proizvoda s aspekta potrošene energije u proizvodnji, upotrebi i reciklaži. Gotovo svaki aluminijski proizvod može biti komercijalno (profitabilno) recikliran na kraju svog korisnog vijeka, bez gubitka na kvaliteti materijala ili njegovih svojstava. Reciklirani aluminiij zahtjeva samo 5 % energije koja je potrebna za proizvodnju "novog" (primarnog) aluminiija. Aluminijski potencijal za reciklažu je gotovo neiscrpan, pa otuda relativno visoka vrijednost

alumijskih otpadaka. Miješanjem recikliranog s primarnim aluminijem omogućava se znatna ušteda energije. Kad bi povratni aluminij dosegao udio od 90 % u novom proizvodu, energija potrebna za njegovu proizvodnju bila bi samo 15 % energije potrebne za novi proizvod potpuno izrađen iz primarnog aluminija. Takva razina efekata ostvaruje se u nekoliko zemalja za lijevane komponente potrebne automobilskoj industriji.

Konkurentnost svake pojedine tvrtke koja proizvodi aluminij, uvjetovana je njenom specifičnom troškovnom pozicijom, koja je određena proizvodnim troškovima za materijal (glinica, anode i dr.), energiju, radnu snagu i kapital. Kakva će ta troškovna pozicija tvrtke biti zavisi od toga kakva je bila inicijalna koncepcija izgradnje tvornice, kakva je primijenjena tehnologija u proizvodnji i kolika je kvalificiranost radne snage, te koliko je u proizvodnom procesu efikasan menadžment. Zato se rezultatna učinkovitost tvornice aluminija izražava kroz iskorištenje struje, specifični utrošak energije, produktivnost i specifične investicijske troškove.

O razvoju kontrole tehnološkog procesa

Kontrola, odnosno regulacija tehnološkog procesa, u početku se svodila na automatsku regulaciju jakosti struje uz ručnu regulaciju napona na svakoj ćeliji pokretanjem anodne ravnine. Dramatičan razvoj u efikasnosti rada ćelija i u načinu kontrole tehnološkog procesa, desio se 70-tih godina prošlog stoljeća, kada je na svakoj ćeliji montiran mikroprocesor, koji joj je dao mogućnost autonomnog rada i regulacije, čime je znatno olakšan posao operatora i nadzornika procesa u ostvarivanju tzv. homogene serije, odnosno dovođenja svih ćelija u približno isto toplinsko/tehnološko stanje, čak i uz možebitne različite parametre. Taj je napredak bio uvjetovan i unapređenjem elektroničkog računalstva, čime se je omogućila široka dostupnost matematičkog modeliranja i simuliranja svih promjena na konstrukciji ćelije. Od tada pa do danas veličina ćelije je i dalje rasla, pa je narasla od 130 kA na čak 600 kA s neslućenim mogućnostima za daljnji napredak.

Od samih početaka, glinica se dozirala u elektrolit samo pri obaranju anodnog efekta i to na način da se probije elektrolitička kora koja prekriva periferne kanale oko anoda i na kojoj je prethodno nasut sloj glinice, kako bi se ista predgrijala i smanjio gubitak topline iz ćelije. U toj fazi razvoja tehnološkog procesa, na ćeliji se pojavljivalo mnogo anodnih efekata dnevno, čak 3-5. Zbog značajki anodnog efekta da je neproduktivan (tijekom njegovog trajanja nema proizvodnje) i rastrošan (guta mnogo energije), te da zbog njegove ručne obrade traje dosta dugo, iskorištenje struje je tada bilo dosta nisko (oko 83-85 %), a specifični potrošak energije dosta veliki (16-18 kWh/kg Al).

U 50-tim godinama prošlog stoljeća zaključeno je, da ne treba čekati anodni efekt da bi se dozirala glinica u ćeliju, pa se tada prišlo redovnom **preventivnom probijanju** kore u cilju doziranja glinice. To je dovelo do smanjenja broja anodnih efekata i tako snizilo potrošak energije, te donekle povećalo iskorištenje struje. Dvadesetak godina iza toga, došlo se do automatskog obaranja anodnog efekta. To je obaranje bilo slično današnjem obaranju efekta. Naime, izvodile su se i tada petlje gore-dolje s anodnom ravninom kako bi se istisnuo plinski sloj ispod anoda uz pretpostavku, da će dio glinice s elektrolitičke kore upasti u tekuću kupku kroz zazor između stranica anoda i skrtnute kupke koja ih bočno dotiče. Pokazalo se da tako upadne toliko glinice koliko je dostatno za rad ćelije od oko jednog sata, pa je poslužitelj ćelija znao da kroz jedan sat mora doći kod te ćelije i ručno je obraditi.

Navedena unapređenja nisu riješila problem velikih oscilacija temperature kupke, uvjetovanih diskontinuiranim ubacivanjem velikih količina glinice, te visokim naponom ćelije tijekom anodnog efekta. Međutim, početkom 80-tih godina francuski Aluminium Pechiney je patentirao sustav **točkastog doziranja glinice**. To je bio pravi okidač za znatno povećanje iskorištenja struje u procesu, a time i za smanjenje specifičnog potroška električne energije. Taj sustav koristi usko područje na početku krivulje zavisnosti otpora elektrolita od koncentracije glinice. To je područje u kojem se ostvaruje visoko iskorištenje struje i u kojem je moguće predvidjeti, pa time i izbjeći, nastup anodnog efekta. Točkastim doziranjem, zbog gotovo kontinuiranog doziranja glinice, snižene su temperaturne oscilacije u kupki, a time i oscilacije u toplinskoj i masenoj ravnoteži. Slijedom toga, postalo je mnogo lakše ostvarivanje tzv. homogene serije ćelija, što je nenadomjestiv uvjet za postizanje optimalnih proizvodnih rezultata.

S točkastim doziranjem glinice Hall-Heroult-ov proces dosegao je visok stupanj usavršenosti. Međutim, ostalo je u procesu još važnih parametara, kao što su kemijski sastav kupke (sadržaj AlF_3), temperatura kupke, te toplinska i masena ravnoteža. Ti se parametri teško mogu učestalo kontrolirati i precizno izmjeriti, a teško je i točno utvrditi vrijeme na koje se odnose izmjerene vrijednosti. Rješenjem toga problema, sustav točkastog doziranja bio bi još efikasniji, jer bi manje oscilacije temperature kupke omogućile precizniju kontrolu sadržaja glinice u kupki, a time i preciznije predviđanje pojave anodnog efekta, odnosno rad s još nižom donjom granicom sadržaja glinice. To bi dodatno povisilo iskorištenje struje i smanjilo broj anodnih efekata. Rezultat svega bi bio i daljnje smanjenje specifičnog potroška električne energije.

Kada se netom iznijetim problemima, dodaju i problemi utjecaja diskontinuiranih radnih operacija u elektrolizi na temperaturu kupke, kao što su zamjena anoda i crpljenje aluminijske kore iz ćelija, očigledno je, da treba i dalje istraživati i razvijati sustav reguliranja tehnološkog procesa. Stanje će pogoršati i neadekvatno ili nepravovremeno doziranje AlF_3 , jer će to izazvati toplinski debalans u ćeliji time što će se uslijed promjene sadržaja

AlF_3 u kupki promijeniti tzv. pregrijanje kupke, koje će mijenjati debljinu bočnih nagiba sve dotle dok se ne ostvari nova toplinska i masena ravnoteža u međupolnom razmaku.

U svijetu se odnedavno započinje s istraživanjima, pa čak i s primjenama, jednog novog sustava kontrole onih parametara procesa, koji se ne mogu obuhvatiti mjerenjima otpora ćelije. Riječ je o sustavu, koji koristi **fuzzy logiku**. Ta je logika, kao koncept, vrlo bliska prirodnim situacijama, u kojima moramo koristiti neprecizne konstatacije i koje se ne mogu izraziti preciznim numeričkim vrijednostima (npr. visoka temperatura može pripadati djelomično području srednje temperature i djelomično području vrlo visoke temperature). U industriji aluminijska kontrola doziranja AlF_3 u kupku izvodi se obično korištenjem jednadžbi, zaštićenih poslovnim tajnama, pa se vrše numeričke aproksimacije. Taj model rada daje slabe efekte, jer je tvornica vrlo nelinearna i kompleksna, pa je njeno modeliranje vrlo teško. Aluminijska industrija pak ima goleme baze podataka, koje sadrže povijesne informacije koje se odnose na tehnološki proces, uključivši i odluke koje donose operatori pri vođenju procesa. To se znanje može upotrijebiti da se razvije **fuzzy kontroler**, baziran na ekspertnom sustavu, čija su pravila generirana iz tvorničkih baza podataka o procesu i intervju s procesnim operatorima.

Druga staza razvoja kontrole procesa, koja teži reduciranju standardne devijacije temperature i pregrijanja kupke, išla je preko konstruiranja novih uređaja na ćeliji: polukontinuiranog & automatskog mjernog uređaja **CMD** (semi Continuous & Automatic Device) i uređaja **CBFD** za doziranje drobljene kupke (Crushed Bath Feeding Device). CMD uređaj vrši dvostruka mjerenja: određivanje visine kupke i mjerenje temperature kupke. Ta su mjerenja integrirana u ukupni lanac kontrola tehnološkog procesa, tj. na razinu mikroprocesora ćelije i na nadzornu razinu serije ćelija. Princip je, da se izračuna prosječna temperatura kupke u ćeliji tijekom zadnje 4 smjene, u cilju eliminiranja utjecaja vremenskog programa izvođenja radnih operacija crpljenja aluminijske anode i zamjene anoda, kao i u cilju korigiranja utjecaja lokacije zamijenjenih anoda u odnosu na položaj otvora na kori, kojeg koristi uređaj CMD. Izračunata prosječna temperatura kupke se unosi u algoritam, koji izračunava korektivnu vrijednost (dodatka AlF_3) kako bi se održala zadana temperatura kupke. Uređaj CMD mjeri visinu kupke i omogućava izračun visine metala u ćeliji za svaku 8-satnu smjenu, pa se procedura kontrole kupke modificira za svaku 8-satnu smjenu umjesto za svaki 32-satni proizvodni ciklus. Kao rezultat navedenog razvojnog puta ostvarena je vrlo stabilna tehnologija uz iskorištenje struje od preko 96 %, uz broj dnevnih anodnih efekata po ćeliji $< 0,05$, te uz potrošak istosmjerne električne energije $< 13 \text{ kWh/kg}$.