

Razvoj sustava profila za aluminijsko-staklene fasade

Špoljarec, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:553346>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Špoljarec

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Pavković

Student:

Ivan Špoljarec

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Nevenu Pavkoviću za svu pomoć i savjete koje mi je dao tijekom izrade ovog diplomskog zadatka, ali i tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Krešimiru Vučkoviću na pomoći i korisnim savjetima vezano uz analizu naprežanja metodom konačnih elemenata.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i svim svojim prijateljima koji su mi olakšali put k diplomi.

Najviše se zahvaljujem tati bez kojeg ništa od ovog ne bi bilo moguće.

Ivan Špoljarec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Špoljarec**

Mat. br.: 0035203967

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj sustava profila za aluminijsko-staklene fasade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of profile systems for aluminum-glass facades**

Opis zadatka:

Novi trendovi i zahtjevi tržišta u građevinskoj industriji zahtijevaju unaprjeđenje i daljnji razvoj sustava aluminijskih, gumenih i plastičnih profila za aluminijsko-staklene fasade. U strojarском području to se posebno odnosi na razvoj sustava spajanja profila u okvire i sustave spajanja profila i/ili tipskih fasadnih elemenata na nosivu konstrukciju zgrade. Diplomski rad se radi u suradnji s poduzećem ALU-KON d.o.o. čija je primarna djelatnost projektiranje i izvođenje aluminijsko-staklenih fasada, ventiliranih fasada i aluminijske stolarije.

U svrhu povećanja energetske učinkovitosti, počela su se koristiti troslojna stakla umjesto dvoslojnih što povećava opterećenje nosivih elemenata fasade. Također su i uvjeti za toplinsku provodljivost profila znatno zahtjevniji. Obzirom na takve zahtjeve u radu je potrebno:

- unaprijediti postojeće sustave kontinuirane fasade AK 50 i „element“ fasade AK E65;
- razviti nove sustave strukturalne kontinuirane fasade AK 50S i strukturalne „element“ fasade AK E65S;
- Unaprijediti postojeći sustav otklopnog prozora u fasadi.

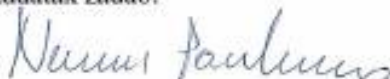
Uz razvoj novih profila, potrebno je izraditi analizu naprezanja metodom konačnih elemenata na dijelovima sustava koji su najopterećeniji (nosač za staklo i spojevi profila). Također, potrebno je izraditi analizu toplinske provodljivosti novorazvijenih sustava kako bi se ustanovio njihov koeficijent prolaza topline.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
12. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
14. siječnja 2021.

Predvideni datum obrane:
18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Pavković

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Sadržaj.....	I
Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis tehničke dokumentacije.....	VI
Popis oznaka	VII
Grčka slova.....	VII
Sažetak	VIII
Summary	IX
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O ALUMINIJSKO-STAKLENIM FASADAMA	2
2.1. Aluminiij	3
2.1.1. Povijest primjene.....	3
2.1.2. Aluminiij u graditeljstvu	6
2.2. Staklo 8	
2.2.1. Staklo u graditeljstvu	9
2.3. Stakleno aluminijske fasade	13
2.3.1. Ovještene fasade.....	13
2.3.2. Povijest.....	13
2.3.3. Konstruiranje.....	15
2.3.4. Tipovi stakleno aluminijskih fasada.....	22
2.4. Suvremeni razvoj	26
2.4.1. Visoko toplinski izolirana stakleno aluminijska fasada.....	26
2.4.2. Recikliranje	28
3. RAZVOJ NOVIH I UNAPREĐENJE POSTOJEĆIH SUSTAVA ALUMINIJSKO-STAKLENIH FASADA	29
3.1. Element fasada AK E65	30
3.1.1. Povećanje naslona stakla.....	32
3.1.2. Modifikacija nosača stakla element fasade	33
3.1.3. Prekid toplinskog mosta.....	34
3.1.4. Bočne vodilice.....	35
3.2. Strukturalna element fasada AK E65S.....	37
3.3. Kontinuirana fasada AK 50.....	41
3.3.1. Sklop pokrovnog i pričvrsnog profila	41

3.3.2. Ekstrudirani navoj u nosivom aluminijskom profilu	43
3.3.3. Klizna spojnica.....	44
3.3.4. Nosač stakla kontinuirane fasade	47
3.3.5. Profil prekida toplinskog mosta	47
3.4. Strukturalna kontinuirana fasada AK 50S.....	49
3.5. Otklopni prozor u fasadi AK 100.....	51
4. ANALIZA TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI.....	56
4.1. Element fasada AK E65	58
4.2. Kontinuirana fasada AK 50.....	59
4.3. Zaključak analize koeficijenta toplinske provodljivosti	60
5. ANALIZA NAPREZANJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA.....	61
6. ZAKLJUČAK	65
LITERATURA.....	66

Popis slika

Slika 1. Poduzeće ALU-KON	1
Slika 2. Stakleno aluminijska fasada	2
Slika 3. Aluminijska stolarija	2
Slika 4. Grumen aluminijska	3
Slika 5. Kristal alumina	4
Slika 6. Shema Hall-Heroultovog procesa	4
Slika 7. Kontrukcija zrakoplova od duralumina	5
Slika 8. Proizvodnja aluminijska po godinama	5
Slika 9. Empire State Building	6
Slika 10. GT Tower East, Seoul	7
Slika 11. Staklene stepenice	8
Slika 12. Staklena vaza	8
Slika 13. Shema Pilkingtonovog procesa	9
Slika 14. Float staklo	9
Slika 15. Primjena Low-E stakla u aluminijskom prozoru	10
Slika 16. Struktura kaljenog stakla	11
Slika 17. Laminirano staklo	12
Slika 18. Usporedba različitih tipova stakla uslijed pucanja	12
Slika 19. Crystal Palace	13
Slika 20. Seagram toranj	14
Slika 21. Princip odvoda vode	15
Slika 22. Fasadni ležajevi	16
Slika 23. Statički proračun fasade	17
Slika 24. Detalj spoja dvaju vertikalnih profila	19
Slika 25. Dvoslojno IZO staklo	20
Slika 26. Ispitivanje na udarni lom stakla	21
Slika 27. Prikaz presjeka kontinuirane fasade	22
Slika 28. Kontinuirana fasada	23
Slika 29. Presjek element fasade	24
Slika 30. Element fasade pri ugradnji	25
Slika 31. DoubleTree by Hilton	25
Slika 32. Elbphilharmonie	26
Slika 33. Razlika u toplinskoj izolaciji	27
Slika 34. Simbol reciklabilnog aluminijska	28
Slika 35. Troslojno IZO staklo	29
Slika 36. Avenue Mall	30
Slika 37. Sklopovi profila AK 001 i AK 002	31
Slika 38. Naslon stakla na brtvu	32
Slika 39. Novi naslon stakla	32
Slika 40. Presjek nosača stakla	33
Slika 41. Usporedba nosača stakla	33
Slika 42. Stari profili prekida toplinskog mosta	34
Slika 43. Novi profili prekida toplinskog mosta	35
Slika 44. Bočne vodilice	36
Slika 45. Strukturalna fasada	37
Slika 46. Modificirani profil okvira (varijacija na AK 001)	38
Slika 47. Modificirani profil ispune (varijacija na AK 002)	38

Slika 48. Shema strukturalnog lijepljenja	39
Slika 49. Graf dozvoljenog područja primjene strukturalne element fasade AK E65S	40
Slika 50. Omega profil	41
Slika 51. "Kapa-podkapa" spoj	42
Slika 52. Usporedba starog i novog dizajna pokrovnog i pričvrstnog profila.....	42
Slika 53. Deformacija stijenke profila izazvana pritezanjem vijka.....	43
Slika 54. Usporedba ureza za navoje (lijevo stari urez, desno novi)	44
Slika 55. Spajanje horizontalnog profila na vertikalni	44
Slika 56. Fiksna spojnica za sistem montaže "ljestve"	45
Slika 57. Sklop klizne spojnice	45
Slika 58. 3D model spoja klizne spojnice	46
Slika 59. 3D model brtve klizne spojnice i presjek spoja klizne spojnice	46
Slika 60. Nosač stakla kontinuirane fasade	47
Slika 61. Detalj spoja PA 66 profila.....	48
Slika 62. Detalj spoja profila za prekid toplinskog mosta i nosivog profila fasade	48
Slika 63. Karakterističan detalj strukturalne fasade AK 50S	49
Slika 64. Detalj strukturalnog pričvrstnog profila	49
Slika 65. Nosač stakla strukturalne kontinuirane fasade.....	50
Slika 66. Karakteristični presjek postojećeg sustava otklopnog prozora u fasadi.....	51
Slika 67. Strukturalni otklopni prozor u fasadi AK 100	52
Slika 68. Dozvoljeno područje primjene otklopnog prozora AK 100.....	53
Slika 69. Shema sustava okova za otvaranje prema van proizvođača Giesse	54
Slika 70. Detalj okova u sustavu profila AK 100.....	55
Slika 71. Brtve sustava AK 100	55
Slika 72. Priprema presjeka za CRORAL	56
Slika 73. Koeficijent toplinske provodljivosti AK E65	58
Slika 74. Temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK E65.....	58
Slika 75. Koeficijent toplinske provodljivosti AK 50.....	59
Slika 76. Temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK 50	59
Slika 77. Pojednostavljeni model	61
Slika 78. Interaction	61
Slika 79. Primjer mreže konačnih elemenata - Free mesh	63
Slika 80. Inicijalna analiza	63
Slika 81. Linija particije za točku određivanja konvergencije	64
Slika 82. Konvergencija modela	64

Popis tablica

Tablica 1. Koeficijent toplinske rastezljivosti.....	18
Tablica 2. Usporedba EN AW 6060 T66 i PA 66.....	34
Tablica 3. Koeficijenti toplinske provodljivosti.....	57
Tablica 4. Rubni uvjeti prema normi EN 10077:2017	57

Popis tehničke dokumentacije

- IŠ – AK E65 – Spajanje elemenata
- IŠ – AK E65-E1 – Detalj otklopnog prozora
- IŠ – AK E65S-E2 – Detalj srednjeg profila
- IŠ – AK 50 – Detalj nosača stakla
- IŠ – AK 50 – Detalj termo prekida
- IŠ – AK 50S – Detalj pričvršćivanja stakla

Popis oznaka

A_{st}	površina stakla, mm^2
E	modul elastičnosti, N/mm^2
L	kraća dimenzija stakla koje se lijepi, mm
p	tlak, N/mm^2
$R_{p0,2}$	granica popuštanja, N/mm^2
S	faktor sigurnosti
S_{Mises}	ekvivalentno naprezanje prema Von Misesu, N/mm^2
U_w	sveukupni koeficijent prolaznosti topline, $\text{W/m}^2\text{K}$
W	opterećenje vjetra, kPa
x	širina površine strukturalnog lijepljenja

Grčka slova

α	koeficijent linearnog rastezanja, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
γ	koeficijent volumnog rastezanja, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
λ	koeficijent prolaznosti topline, W/mK
μ	koeficijent trenja
ν	Poissonov koeficijent
ρ	gustoća, kg/m^3
σ_{dop}	dopušteno naprezanje, N/mm^2

Sažetak

Ovaj diplomski rad, izrađen je u suradnji s poduzećem ALU-KON d.o.o., čija je primarna djelatnost izvođenje aluminijsko-staklenih fasada i aluminijske stolarije. U diplomskom radu objašnjeni su tipovi aluminijsko-staklenih fasada i principi konstruiranja. Poduzeće ALU-KON ima interno razvijene sustave profila za aluminijsko-staklene fasade. U ovom diplomskom radu, ti postojeći sustavi su preoblikovani i nadograđeni kako bi zadovoljili suvremene zahtjeve tržišta posebno one vezane uz teška moderna troslojna IZO stakla i niske koeficijente prolaznosti topline. Također, razvijeni su i novi sustavi aluminijsko-staklenih fasada sa strukturalnim staklom, odnosno gdje je s vanjske strane vidljivo samo staklo. Na kraju je izrađena numerička analiza toplinske provodljivosti novih redizajniranih sustava profila i izrađena je analiza naprezanja u određenim dijelovima konstrukcije metodom konačnih elemenata.

Ključne riječi: aluminij, staklo, fasada, koeficijent toplinske provodljivosti, metoda konačnih elemenata, profil, konstruiranje, strojarstvo, građevina

Summary

This master's thesis is made in cooperation with ALU-KON d.o.o., whose business primarily focuses on glass and aluminium curtain walls and aluminium windows and doors. Types of curtain walls and the principles for the design of aluminium-glass curtain walls are explained in this master's thesis. The company ALU-KON d.o.o., has internally designed and developed systems for aluminium-glass curtain walls. In this master's thesis, the existing systems have been redesigned and upgraded to conform to modern demands for aluminium glass curtain walls, specifically those concerning heavy triple glazed isolation glass units and low coefficients of heat transfer. Also, new structurally glazed systems for aluminium-glass curtain walls have been designed, which have an all-glass exterior. In the end of the master's thesis, a numerical calculation has been made to determine the coefficients of heat transfer in the redesigned profile systems and a stress analysis has been made on some parts using finite elements method.

Key words: aluminium, glass, curtain wall, facade, coefficient of heat transfer, finite elements analysis, finite elements method, profile, design, mechanical engineering, civil engineering, construction

1. UVOD

Tema ovog rada je razvoj sustava aluminijskih, gumenih i plastičnih profila za aluminijsko staklene fasade i razvoj sustava spajanja profila u okvire i sustava spajanja profila i/ili predgotovljenih fasadnih elemenata na nosivu konstrukciju zgrade. Diplomski rad se radi u suradnji s poduzećem ALU-KON d.o.o., čija je primarna djelatnost projektiranje i izvođenje aluminijsko staklenih fasada, ventiliranih fasada i aluminijske stolarije. Tvrtka ALU-KON u svom intelektualnom vlasništvu ima interno razvijen sustav profila za element fasadu i kontinuiranu fasadu pod nazivom AK 65 i AK 50 koji su razvijeni 2008. godine.



Slika 1. Poduzeće ALU-KON

Trendovi u građevini su se od tada izmijenili, najznačajnije u području energetske učinkovitosti. U svrhu smanjenja prolaznosti topline, počela su se koristiti troslojna stakla umjesto dvoslojnih, time povećavajući masu i opterećenje fasade i uvjeti za toplinsku provodljivost profila znatno su zahtjevniji. Stoga je potrebno prilagoditi sustave AK 50 i AK 65 za moderne zahtjeve u građevinskoj industriji. Također, radi zahtjeva tržišta, potrebno je razviti i posebne sustave pričvršćivanja stakla koje daje uniforman izgled fasade, odnosno, da se vidi samo staklo.

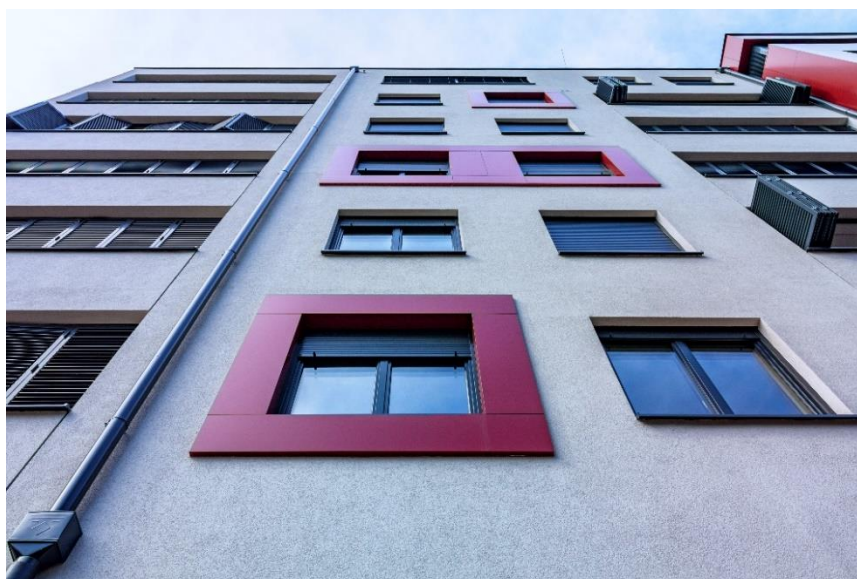
U opsegu ovog rada, prilagodit će se postojeći sustav element fasade AK E65 i prema njemu će se razviti novi sustav strukturalne element fasade AK E65S. Jednako tako, prilagodit će se postojeći sustav kontinuirane fasade AK 50 i iz njega razviti novi sustav strukturalne kontinuirane fasade AK 50S. Nadalje, prilagodit će se postojeći sustav otklopnog prozora za fasadu. Zatim će se izraditi analiza naprezanja deformacija i pomaka metodom konačnih elemenata dijela koji nosi staklo kako bi se odredila dopuštena masa stakla. U konačnici, izradit će se analiza toplinska analiza presjeka novo razvijenih profila kako bi se odredio koeficijent toplinske provodljivosti.

2. OPĆENITO O ALUMINIJSKO-STAKLENIM FASADAMA

Središnja tema ovog rada su stakleno aluminijske fasade. Stakleno aluminijske fasade neizostavan su element u suvremenoj visokogradnji pa stoga imaju velik udio u građevnoj industriji. Također, kao proizvod koji povezuje eksterijer zgrade sa interijerom, uz vrlo važnu estetsku funkciju, imaju i još važniju funkciju značajnog utjecaja na energetska učinkovitost zgrade. Kroz ovaj projekt, prikazat će se povijest korištenja aluminija i stakla općenito i u graditeljstvu, zatim će se analizirati stakleno aluminijske fasade. Nadalje, analizirat će se konstrukcijska rješenja i na kraju prikazat će se smjer u kojem bi se trebala razvijati primjena stakleno aluminijskih fasada u građevinarstvu u budućnosti. Na slici 2. prikazana je zgrada sa stakleno aluminijskom fasadom, a na slici 3., zgrada s aluminijskom stolarijom.



Slika 2. Stakleno aluminijska fasada



Slika 3. Aluminijska stolarija

2.1. Aluminij

Aluminij je srebrno-bijeli sjajan laki metal. Grumen čistog aluminija prikazan je na slici 4. Male je gustoće, izrazito duktilan, a legiran s pravim metalima može postići visoku vlačnu čvrstoću i time stvoriti vrlo povoljan omjer čvrstoće i gustoće što ga čini vrlo povoljnim konstrukcijskim materijalom. Također, vrlo bitna značajka aluminija jest njegova korozijska postojanost. Naime, aluminij ima velik afinitet prema kisiku pa na svojoj površini tvori sloj oksida koji ima vrlo visoku tvrdoću i temperaturu tališta. Površinski sloj oksida, ukoliko se ošteti, odmah se zamijeni novim, osim ako se ošteti lužinama. Naime, lužine imaju veoma štetno djelovanje na površinski sloj oksida pa je u građevini vrlo bitno zaštititi profile sa samoljepljivom folijom kako žbuka, beton i vapno ne bi oštetili površinu aluminija.



Slika 4. Grumen aluminija

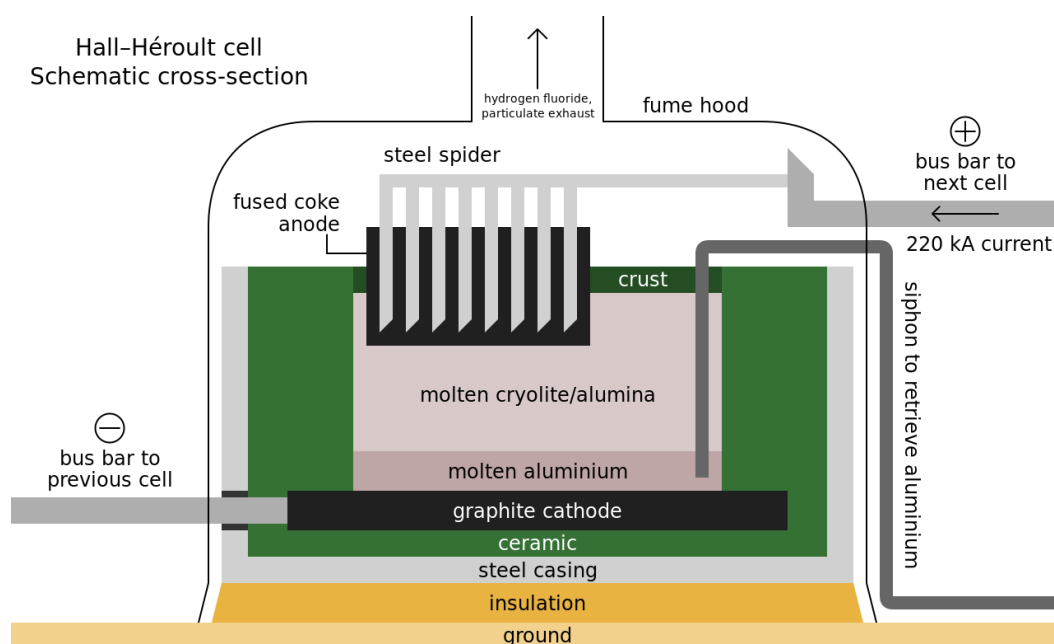
2.1.1. Povijest primjene

Aluminij u čistom stanju je u prirodi vrlo rijedak te se prvi put izdvojio iz raznih ruda tek u 19. stoljeću. Do tad je u obliku različitih spojeva imao vrlo široku primjenu, primjerice, u obliku aluma, koristio se za zaštitu drva od požara. Tijekom godina, mnogo je znanstvenika pokušavalo izolirati aluminij iz njegovih spojeva različitim kemijskim postupcima, ali nažalost nikad nisu uspjeli dobiti dovoljno čist aluminij da bi se smatralo otkrićem. Na slici 5. prikazan je kristal aluma, jednog od mnogih kemijskih spojeva koji sadržavaju aluminij.



Slika 5. Kristal aluma

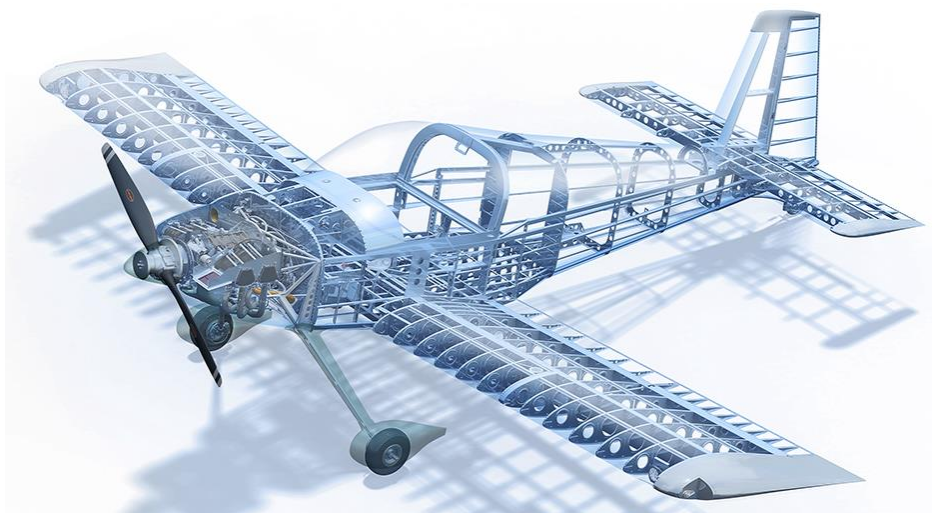
Krajem 19. stoljeća izumljen je prvi ekonomski isplativ proces rafinacije aluminija. Hall-Heroult proces zasniva se na elektrolizi aluminijskog oksida dobivenog iz aluminijeve glavne rude, boksita, pomoću kemijskog procesa naziva Bayerov postupak. Hall-Heroultov proces prikazan je na slici 6. Uz pojeftinjenje struje, Hall-Heroult proces omogućio je masovnu proizvodnju aluminija čistoće 99,5-99,8%. Također, ovaj je postupak uzrokovao smanjenje cijene aluminija te je aluminij postao primjenjiv materijal, umjesto plemeniti metal kojim ga se smatralo prije ovog otkrića.



Slika 6. Shema Hall-Heroultovog procesa

Vrlo brzo nakon otkrića Hall-Heroultovog postupka, aluminij je našao široku primjenu u različitim industrijama. Nakit, optičarski instrumenti, pribor za kuhanje i aluminijska folija samo su neki od primjera primjene aluminija u svakodnevno korištenim proizvodima.

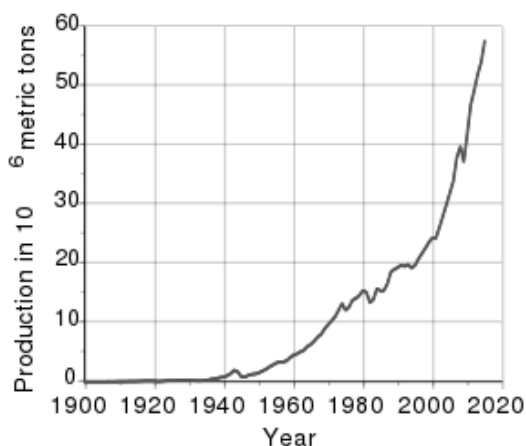
Nedugo nakon početka masovne primjene aluminija, otkrilo se da, legiranjem s drugim metalima, aluminij može tvoriti legure odličnih mehaničkih svojstava, odnosno visoka čvrstoća uz nisku gustoću. Legura aluminija i bakra, duraluminij, našla je već prije prvog svjetskog rata veliku primjenu u zrakoplovstvu te se i danas koristi za izradu konstrukcija zrakoplova.



Slika 7. Kontrukcija zrakoplova od duralumina

U prvom svjetskom ratu, proizvodnja i potražnja za aluminijem strahovito su porasle. Primjerice, 1900. godine, godišnja proizvodnja aluminija iznosila je oko 6 800 tona, a 1916. iznosila je 100 000 tona. Potražnja je toliko porasla da se nije moglo proizvesti dovoljno aluminija. Stoga se već početkom 20. stoljeća aluminij masovno reciklira. Tijekom drugog svjetskog rata, aluminij se smatra strateškim materijalom i njegova godišnja proizvodnja doseže 1 000 000 tona 1941. godine.

Nakon drugog svjetskog rata, proizvodnja i potražnja aluminija kontinuirano rastu, a s njima i primjena. Aluminij se masovno počinje koristiti u svemirskoj industriji, željezničkom prometu, transportu električne energije, automobilske industriji i u skladištenju pića. Trenutno, aluminija se proizvodi više nego sve druge metale, osim onih na bazi željeza.



Slika 8. Proizvodnja aluminija po godinama

2.1.2. *Aluminij u graditeljstvu*

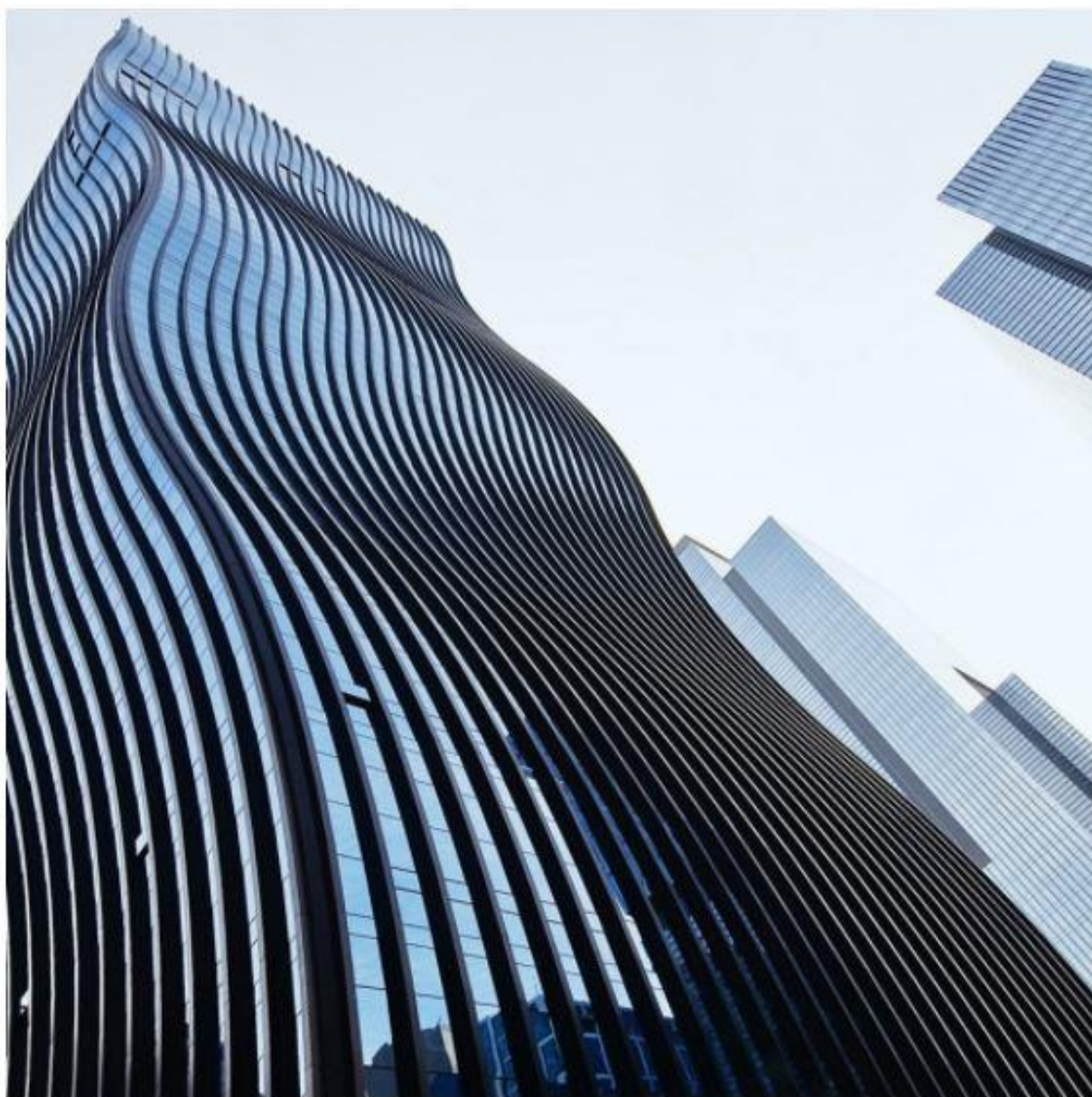
Početak dvadesetog stoljeća, aluminij se vrlo malo koristio u graditeljstvu radi visoke cijene i nedovoljne proizvodnje. Primjenom Hall-Heroultovog postupka, cijena aluminija smanjila se za 80% te je njegova primjena u graditeljstvu značajno porasla. Prvi značajni projekt u graditeljstvu u kojem se koristio aluminij je neboder Empire State Building u New Yorku 1931. godine. Špalete oko prozora, dijelovi fasade, krov i mnogi reljefi unutar Empire State Buildinga izrađeni su od aluminija.



Slika 9. Empire State Building

Nakon drugog svjetskog rata, mnogi neboderi su, uzorom na Empire State Building, projektirani sa sve više elemenata od aluminija. Tako su se krovovi, okviri prozora i vrata, fasade, opšavi, žlijebovi, namještaj, sustavi za grijanje i hlađenje počeli sve više proizvoditi od aluminija a sve manje od bilo kojih drugih materijala.

Aluminij je vrlo primjenjiv u graditeljstvu radi vrlo povoljnih svojstava koje ga čine otpornim na koroziju i veliki raspon temperatura. Aluminij ima životni vijek od 80 godina uporabe u ekstremnim uvjetima. Najbitnija karakteristika aluminija koja ga čini iznimno povoljnim materijalom za primjenu u građevinarstvu je odličan omjer čvrstoće i specifične težine. Uz skoro dvostruko manju težinu od čelika, ima jednaku čvrstoću. Ovo svojstvo čini ga neophodnim u izgradnji suvremenih nebodera radi ogromne uštede na količini materijala u izradi temelja i nosive konstrukcije zgrade. S arhitektonske, odnosno estetske strane, povoljna karakteristika aluminija je njegova kovljivost i obradljivost koje rezultiraju postizanjem izvanrednih oblika koje ni jedan drugi materijal ne može postići. Rezultat svih ovih povoljnih svojstava je činjenica da 25% svog proizvedenog aluminija koristi se za građevinarstvo.



Slika 10. GT Tower East, Seoul

2.2. Staklo

Staklo je prozirna amorfna krutina s veoma širokom tehnološkom primjenom. Dobiva se gašenjem različitih smjesa kemijskih spojeva, ovisno o primjeni, a najzastupljeniji kemijski spoj u tim smjesama je silicijev dioksid. Staklo se veoma dugo proizvodi i obrađuje, čak od 3 600 godina prije Krista. Kroz povijest uglavnom se koristilo za posuđe jer ima svojstva slična keramici. Kroz povijest često su se pojavljivale regije s izraženom stručnosti u izradi i preradi stakla te su danas tehnologije vezane uz staklo veoma razvijene i kvalitetne. Radi duge tradicije izrade stakla i kvalitete proizvodnje danas se staklo primjenjuje u raznim proizvodima i industrijama. U ovom radu pomnije će se obrađivati samo staklo koje se koristi u stakleno aluminijskim fasadama i stolariji. Kao primjer raznovrsnosti stakla, na slici 11. prikazane su staklene stepenice, dok je na slici 12. prikazana vaza od kristalnog stakla.



Slika 11. Staklene stepenice



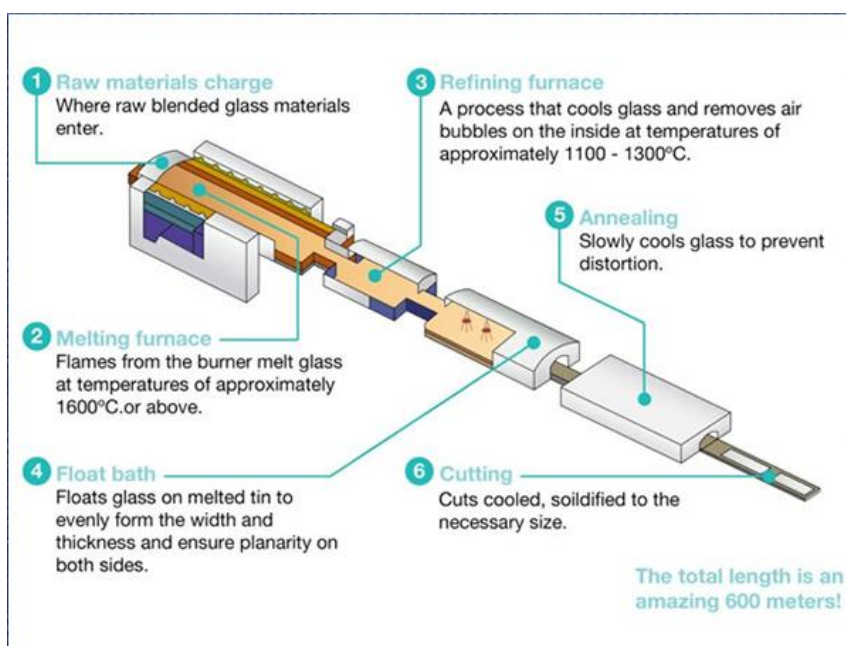
Slika 12. Staklena vaza

2.2.1. Staklo u graditeljstvu

Kao što je već spomenuto, središnja tema ovog rada jesu stakleno aluminijske fasade, stoga će se u ovom poglavlju analizirati staklo koje se najčešće koristi u navedenom građevinskom elementu.

2.2.1.1. Float staklo

Staklo koje se koristi u stakleno aluminijskim fasadama i aluminijskoj stolariji je takozvano natrijevo staklo, jer uz 72 % silicijevog dioksida, u svom sastavu ima čak 13% natrijevog oksida. Ovo staklo je prozirno i lako obradljivo. U suvremenim proizvodnim procesima, ovaj tip stakla, dobiva se izlijevanjem taljevine stakla na kositar ili olovo ili neki drugi metal s visokom gustoćom, a niskim talištem. Tekuće staklo pluta na rastaljenom metalu i nivelira se, stvarajući uniformnu debljinu po cijelom volumenu te se polako hladi. Prema tome, ovaj tip stakla se naziva float staklo, a proces se naziva Pilkingtonov proces. Na slici 13. prikazan je proces izrade float stakla, a na slici 14. samo float staklo. Ovakvo staklo koristi se na mjestima gdje nema velikih zahtjeva o sigurnosti i mehaničkoj otpornosti niti energetske učinkovitosti.



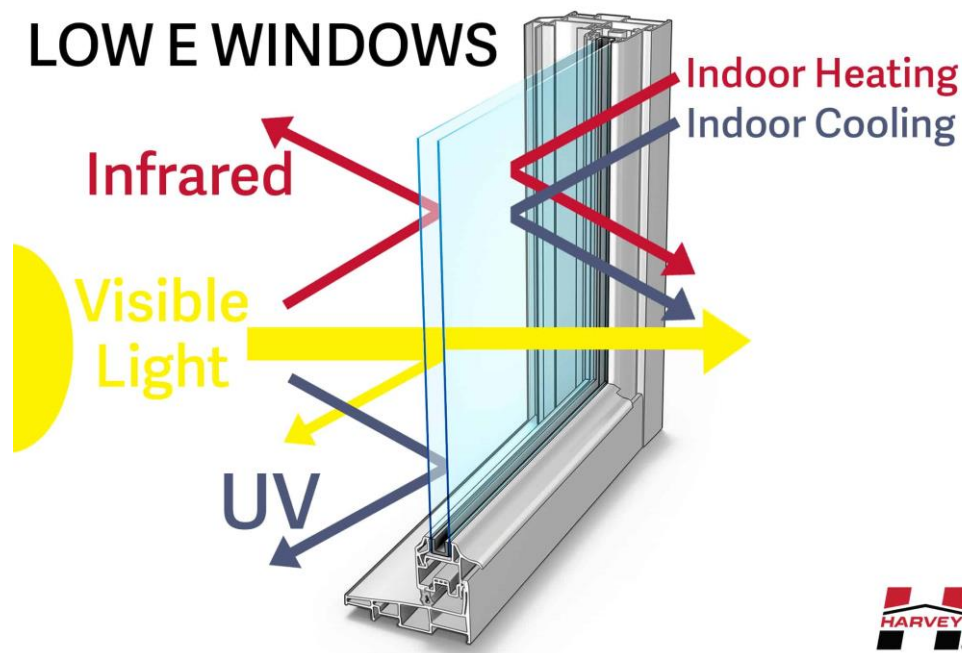
Slika 13. Shema Pilkingtonovog procesa



Slika 14. Float staklo

2.2.1.2. Staklo s metalnim premazom

Staklo s metalnim premazom, odnosno Low-E (Low-Emission) staklo je float staklo na koje je nanesen tanak sloj metalnog oksida. Razlog tome je minimiziranje količine infracrvenog i ultraljubičastog svjetla koje prolazi kroz staklo, odnosno smanjivanje količine provedene topline između interijera i eksterijera. Time se povećavajuća energetska učinkovitost samog stakla efektivno održavajući konstantnu temperaturu u interijeru. Ovisno o izvedbi, primjena Low-E stakla može smanjiti potrošnju energenata i do 75%. Na slici 15. nalazi se shematski prikaz funkcioniranja Low-E stakla.



Slika 15. Primjena Low-E stakla u aluminijskom prozoru

Postoje dva tipa Low-E premaza:

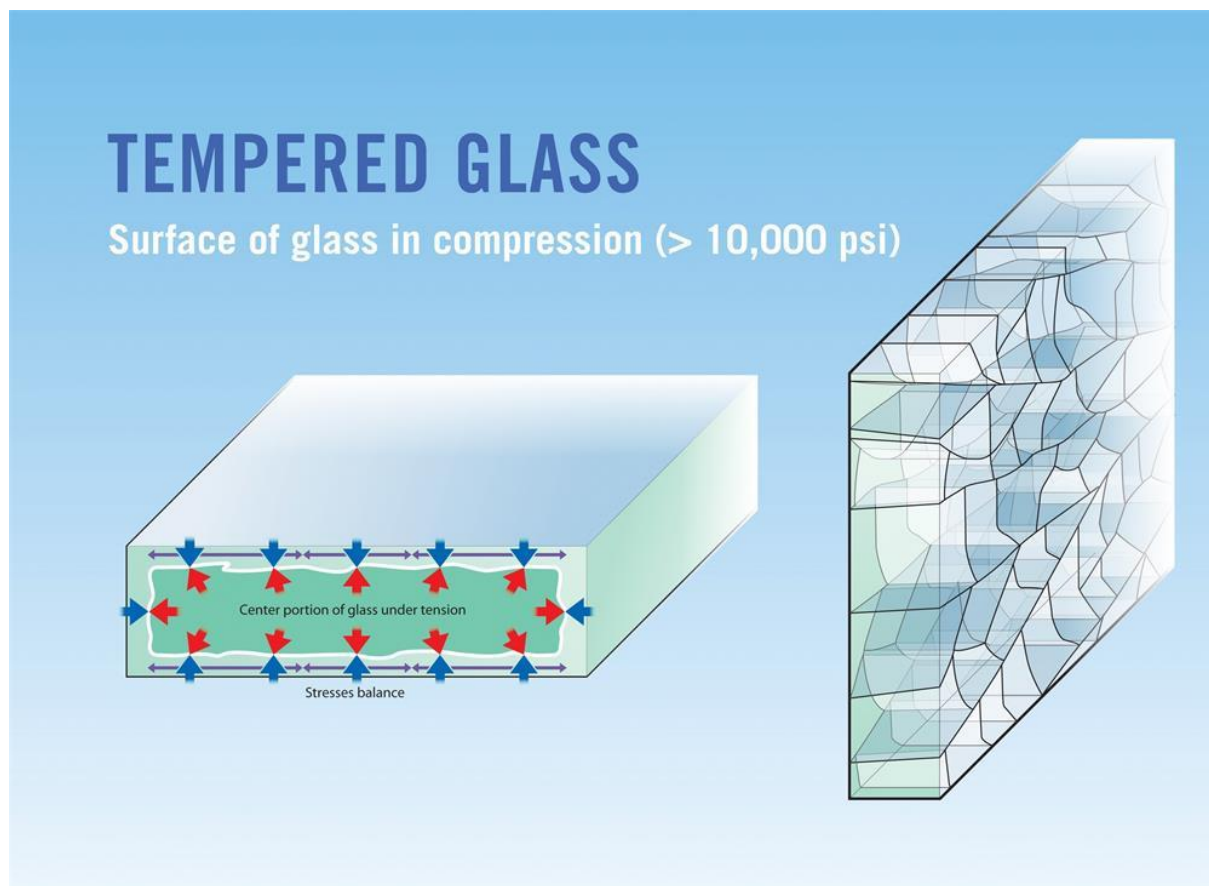
- Tvrđi premazi (pasivni premazi) nanose se prilikom Pilkingtonovog procesa, spajajući se s površinom stakla. Tvrđi premazi tvore jako čvrstu vezu sa staklom pa ih je stoga teško skinuti s površine stakla i oni se mogu stavljati na vanjske plohe stakla. Primjenjuju se u hladnijim klimama jer dozvoljavaju nekim kraktovalnim frekvencijama infracrvenog svjetla da prodru u interijer i tako zagrijavaju prostor, ali im također ne dozvoljavaju da pobjegnu van iz prostorije.
- Meki premazi nanose se nakon hlađenja float stakla u vakuumu. Ovi premazi ne smiju se stavljati na vanjske plohe stakla, već uvijek moraju biti zatvoreni unutar IZO paketa. Stakla s ovim premazima koriste se u toplijim klimama jer bolje odbijaju UV zrake pri jačoj izloženosti Suncu, time sprječavajući zagrijavanje zraka u prostoriji, ali jednako tako zimi sprječavaju prolazak topline prema van.

2.2.1.3. Kaljeno staklo

Kaljeno staklo je toplinski obrađeno float staklo s ili bez metalnog premaza koje se koristi pri visokim zahtjevima za sigurnost stakla, otpornost na mehaničke udarce i toplinske deformacije. Kaljenje stakla uzrokuje da se vanjske površine ploha stakla tlačno napregnu, a unutrašnjost staklene ploče vlačno. Svrha ovog postupka je onemogućavanje propagacije pukotine na staklu. Naime, pri iniciranju pukotine na površini običnog stakla, s obzirom da ono nema nikakva tlačna naprežanja na površini, pukotina propagira brzinom zvuka u staklu čim se staklo vlačno optereti. Tlačno naprežanje na površinama stakla onemogućuje upravo tu propagaciju. Također, kaljenje stakla uzrokuje da se, pri razbijanju, staklo razbije na sitne komadiće, umjesto na velike oštre komade kao float staklo.

Proces kaljenja stakla odvija se u posebnoj peći s keramičkim valjcima. Staklo se zagrijava na temperaturu oko 620 °C. Staklo se zatim vrlo brzo hladi zračnim mlazovima. Prilikom hlađenja, površine stakla brzo se skrućuju, a unutrašnjost neko vrijeme ostaje tekuće. Time se stvaraju tlačna naprežanja na površinama, a vlačna u unutrašnjosti. Na slici 16. prikazan je taj fenomen.

Kaljeno staklo ima otprilike četiri puta veću čvrstoću nego obično staklo. Kaljeno staklo koristi se na vozilima, nekom posuđu, pećnicama i mobitelima, među ostalim. U građevinskoj industriji, tehničkim je propisima za sigurnosna stakla, određeno kako i gdje se mora koristiti kaljeno staklo, a to su samostalna staklena vrata (bez okvira od drugog materijala), staklene fasade, velike plohe stakla, u blizini bazena.



Slika 16. Struktura kaljenog stakla

2.2.1.4. Laminirano staklo

Laminirano staklo, drugi je tip sigurnosnog stakla čija je karakteristika da se ne raspadne kad pukne, već da ostane na mjestu. Laminirano staklo sastoji se od dva float stakla koja mogu biti kaljena ili imati metalni premaz. Između dva sloja stakla nalazi se polimerska folija čija je svrha onemogućavanje razbijenom staklu da se odvoji od plohe. Laminirano staklo koristi se na mjestima gdje je kontakt između čovjeka i stakla svakodnevan. Primjerice, staklene ograde, ulazna vrata, automobili, unutarnje strane velikih prozorskih stijena.

Laminirano staklo može ostvariti dobra svojstva zvučne izolacije povećanjem debljine folije. Također, vrlo korisna značajka ovog stakla proizlazi iz činjenice da folije koje se koriste između staklenih ploča veoma dobro reflektiraju UV zračenje.

Najčešći postupak izrade laminiranog stakla započinje nanašanjem PVB (polivinil butiral) ili EVA (etilen-vinil acetat) folije na jednu plohu stakla. Zatim se nanese druga ploha stakla i skupa se unesu u autoklav gdje se na velikim temperaturama i tlakovima izbacuju svi mjehurići zraka i osigurava se bespriječna kohezivnost slojeva laminiranog stakla. Na slici 17. prikazano je par debljina laminiranog stakla, a na slici 18. usporedba pucanja običnog, kaljenog i laminiranog stakla.



Slika 17. Laminirano staklo



Slika 18. Usporedba različitih tipova stakla uslijed pucanja

2.3. Stakleno aluminijske fasade

U sljedećem poglavlju analizirat će se povijest primjene stakleno aluminijskih fasada, također, prikazat će se neke tehničke značajke tih građevinskih elemenata.

2.3.1. Ovješene fasade

Ovješene fasade (eng. *Curtain wall*) su arhitektonski i građevinski elementi koji zamjenjuju punu, nosivu vanjsku ovojnicu zgrade. Ovješene fasade vješaju se na nosivu konstrukciju zgrade preko metalnih konzola. Na taj način na nosivu konstrukciju zgrade prenose opterećenja od vlastite težine, vjetra, kiše i snijega. Dakle, s obzirom da se preko ovješene fasade ne prenosi opterećenje težine zgrade, u svrhu redukcije cjelokupne mase zgrade, idealan materijal za izradu ovješene fasade je upravo aluminij. Najčešća ispunjena aluminijskih ovješene je staklo radi estetike, propuštanja sunčeve svjetlosti i, ovisno o izvedbi, veoma dobrih izolacijskih svojstava. Primjer jedne stakleno aluminijske fasade može se vidjeti na slici 1.

2.3.2. Povijest

Prva značajna zgrada sa staklenom fasadom izgrađena je 1851. godine u Londonu te nosi naziv Crystal Palace., prikazana na slici 19. Kompletna fasada i krov Crystal Palacea izvedeni su od staklenih ploča na čeličnim profilima i cijevima ili drvenim gredama. Izgradnja Crystal Palacea predstavlja prijelomni trenutak u arhitekturi fasada radi novog načina obavljanja zgrada i iako nema aluminija u njoj konstrukciji, svaka suvremena stakleno aluminijska fasada potiče upravo od Crystal Palacea.



Slika 19. Crystal Palace

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća počinje masovna izgradnja nebodera u Sjevernoj Americi, posebno na Manhattanu. Uzorom na Crystal Palace, mnogo tih nebodera sve više uvodi staklo u svoje fasade. Godine 1958. izgrađen je Seagram toranj, među prvima je neboderima na svijetu s kompletnom staklenom fasadom. Seagram toranj prikazan je na slici 12. Njegovom izgradnjom pokreće se masovna izgradnja nebodera na Manhattanu sa staklenom fasadom.



Slika 20. Seagram toranj

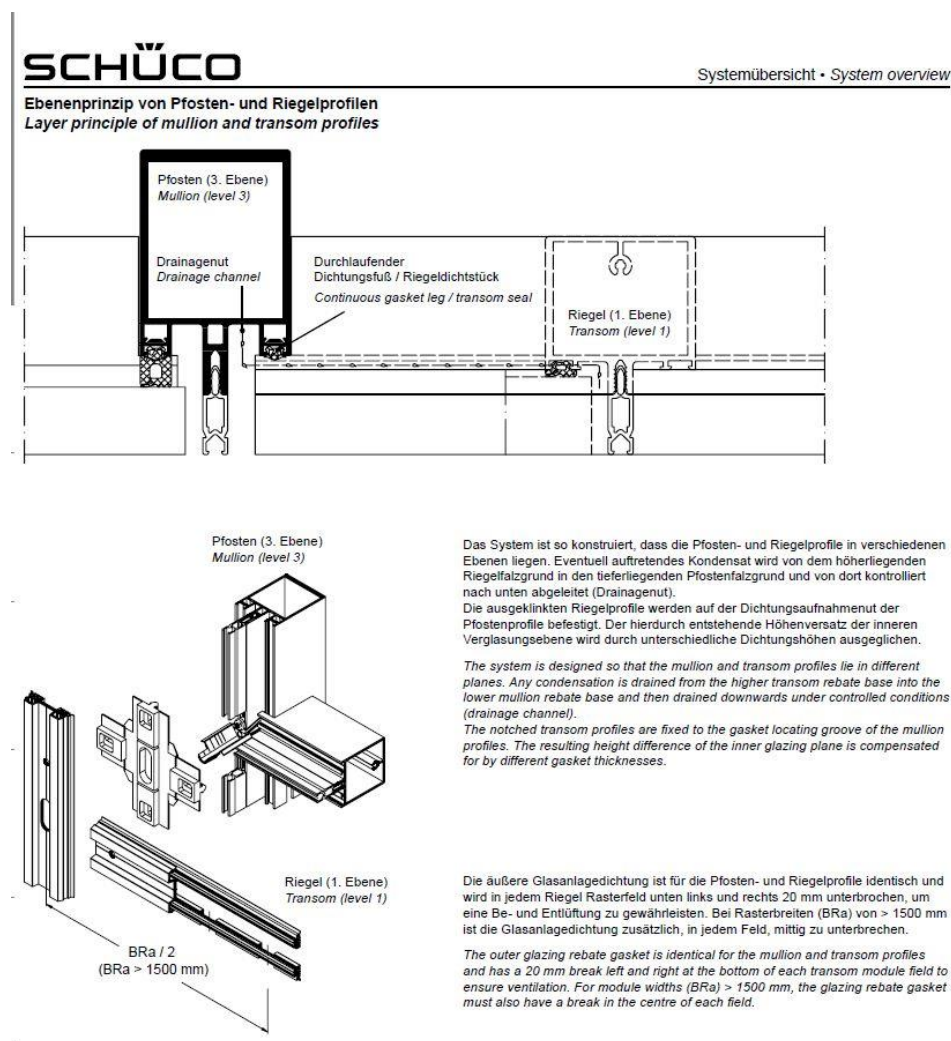
Nedugo nakon izgradnje Seagram tornja i početka masovne izgradnje staklenih nebodera, aluminij se počeo koristiti kao podkonstrukcija staklenih fasada. Izgradnja današnjih nebodera nezamisliva je bez aluminija.

2.3.3. Konstruiranje

Konstruktivski uvjeti koje ovještene fasade moraju zadovoljavati su vodonepropusnost, zrakonepropusnost, čvrstoća i stabilnost, seizmička stabilnost, toplinska dilatacija, toplinska izolacija i otpornost na udarni lom. U ovom poglavlju objasniti će se način ispunjavanja svakog od ovih uvjeta.

2.3.3.1. Vodonepropusnost i zrakonepropusnost

Vodonepropusnost i zrakonepropusnost osiguravaju se brtvljenjem profiliranim brtvama od EPDM (etilen propilen dien monomer) guma na spojevima aluminijske i stakla. Neophodno je imati barem dva seta brtvi koje odvajaju interijer i eksterijer kako nebi došlo do prodora vode i zraka. Presjek stakleno aluminijske fasade vidljiv je na slici 21. Također, vrlo je bitno osigurati kanale za odvodnju zaostale vode. Voda se može skupljati na horizontalnim profilima tako da proдре prvi sloj brtvljenja i ostane u međuprostoru, također može i kondenzirati uslijed promjene vremena. Kako bi se izbjeglo pojavljivanje vode u interijeru, potrebno je vodu kontinuirano odvoditi u kanalima na vertikalnim profilima koji su prikazani na slici 20, kao i zarezivanje brtvi s donje strane horizontale kako bi se voda iscjedila kroz te otvore.



Slika 21. Princip odvoda vode

2.3.3.2. Čvrstoća i stabilnost

Uvjet čvrstoće i stabilnosti ispunjava se zadovoljavajućim statičkim momentom tromosti i površinom presjeka profila. Aluminij ima veoma nizak modul elastičnosti, stoga je za smanjenje elastičnosti profila potrebno kompenzirati povećavanjem statičkog momenta tromosti presjeka. Savojno opterećenje uzrokovano je udarima vjetra (na vertikalnoj fasadi i krovovima) i težine snijega (na krovovima). Profil se uvijek oslanja na dva „ležaja“ (jedan fiksni, a drugi klizni) i u ovoj se situaciji ponaša kao greda na dva oslonca s kontinuiranim opterećenjem.

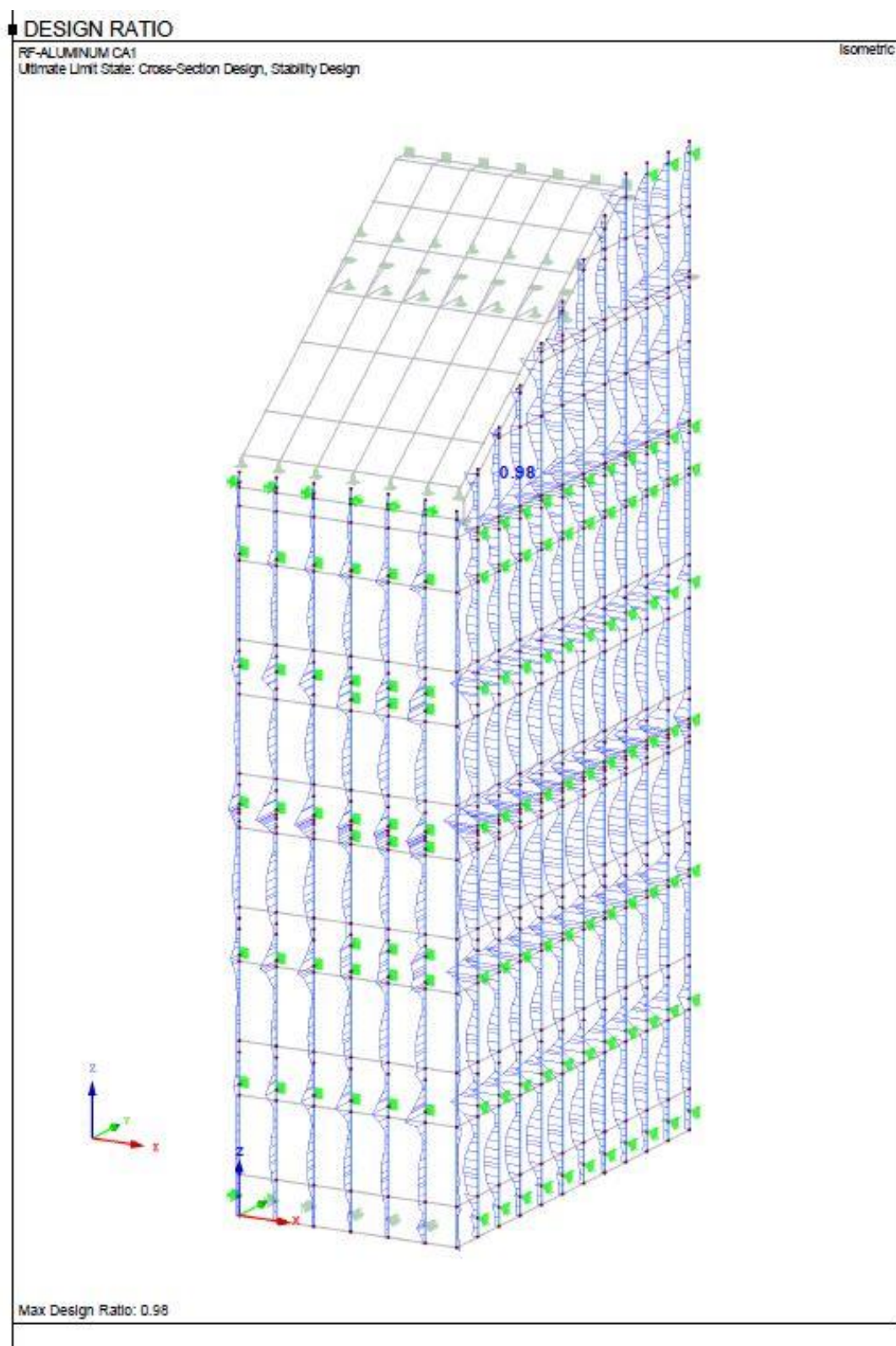
Ukoliko je gornji ležaj fiksni a donji klizni, opterećenje od težine stakla djeluje na profil tako da ga razvlači. Stoga je bitno imati dovoljno veliku površinu presjeka profila kako nebi došlo do plastične deformacije. Ukoliko je donji ležaj fiksni, a gornji klizni manje je opterećenje na sam profil, ali veće na spojne elemente (vijke, zakovice, spojnice), stoga je potrebna dovoljna vlačna čvrstoća materijala kako nebi došlo do razaranja tih spojeva. Fiksni ležaj na sebi ima kružne rupe za matične vijke, a klizni elipsaste s duljim krakom u vertikalnom smjeru, ležajevi su prikazani na slici 22.



Slika 22. Fasadni ležajevi

U prilog je dana izjava o svojstvima za leguru AlMgSi0,5, odnosno EN AW6060 T66 koja se skoro isključivo koristi u profilima za stakleno aluminijske fasade i aluminijsku stolariju, također, u prilogu je dan i izvadak iz kataloga proizvođača profila u kojem je prikazan izbor vertikalnih profila određene serije za izvedbu stakleno aluminijskih fasada s različitim statičkim momentima otpora, ovisno o potrebi.

Bitno je naglasiti da, pri ovim slučajevima, čvrstoća stakla ne igra veliku ulogu jer je veoma kruto te praktički prenosi opterećenje kao kruto tijelo. Štoviše, svojom krutošću i težinom može povoljno utjecati na aluminij, onemogućavajući mu da radi velike progibe uslijed opterećenja. Na slici 23. prikazani su rezultati naprezanja u aluminijskoj konstrukciji uspijed opterećenja vlastitom težinom i udarom vjetra.



Slika 23. Statički proračun fasade

2.3.3.3. Toplinska dilatacija i seizmička stabilnost

Toplinsko širenje veoma je izraženo u stakleno aluminijskim fasadama. Aluminiij je veoma dobar vodič topline, a koeficijent linearnog toplinskog rastezanja mu iznosi 25×10^{-6} , što je vrlo velika vrijednost. Za usporedbu, koeficijent linearnog toplinskog rastezanja čelika iznosi 12×10^{-6} , što je duplo manje od aluminiija. Bitan je i koeficijent toplinskog rastezanja stakla, koji je, uz neke druge materijale vidljiv u tablici 1.

Tablica 1. Koeficijent toplinske rastezljivosti

Materijal	Koeficijent linearnog rastezanja α [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	Koeficijent volumnog rastezanja γ [$10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
Aluminiij	25	75
Mesing	19	56
Željezo	12	35
Srebro	19	56
Bakar	17	51
Olovo	29	87
Staklo	9	27
Kvarc	0,4	1
Beton	12	36
Mramor	2	6

S obzirom da su stakleno aluminijske fasade izložene velikoj temperaturnoj promjeni na dnevnoj bazi, bitno je osigurati sigurno rješenje za toplinsko rastezanje materijala, odnosno toplinske dilatacije.

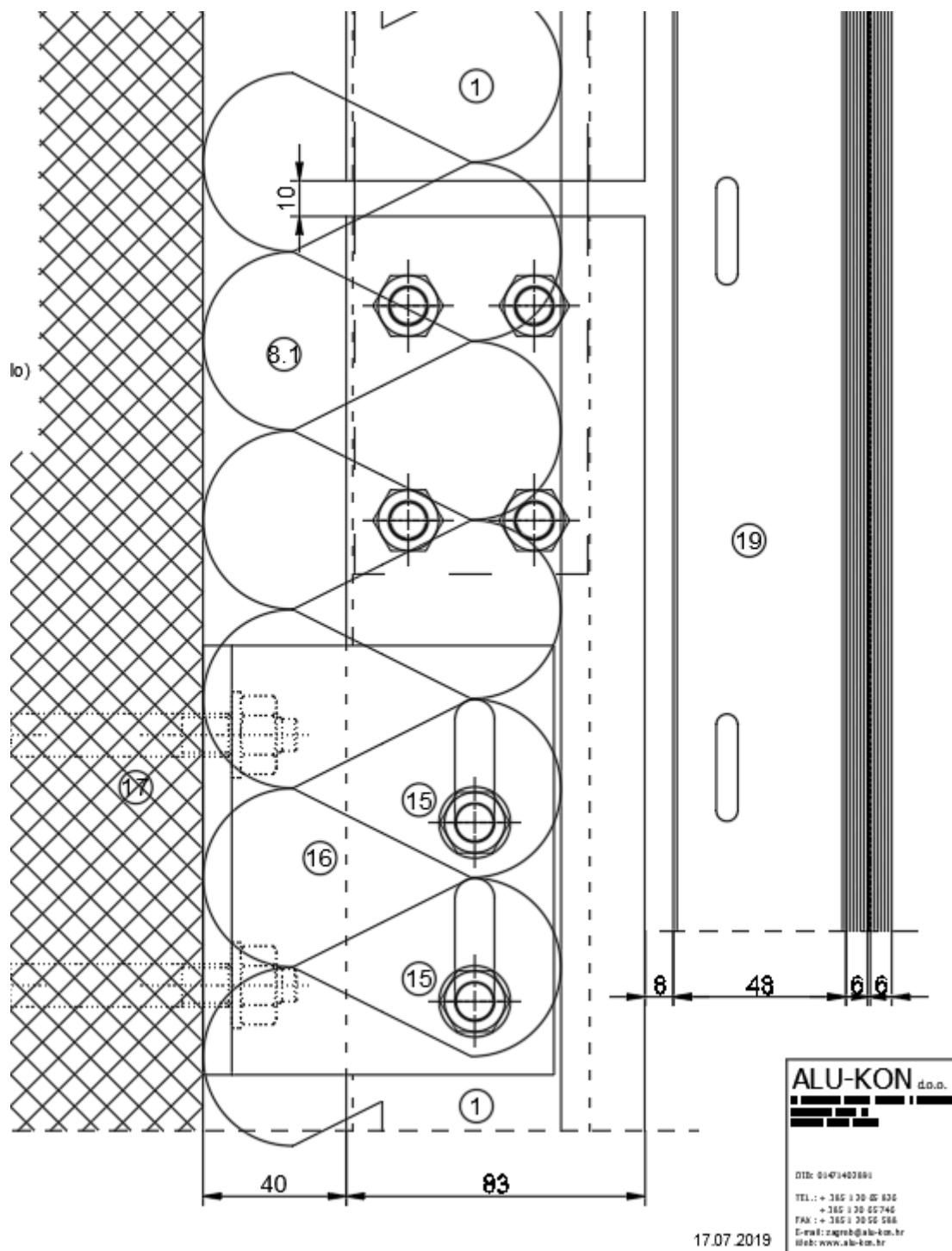
Kod staklenih polja, toplinska dilatacija ostvaruje se osiguravanjem dovoljnog prostora za širenje u tri smjera. Staklo je oslonjen na aluminijsku podkonstrukciju preko dva nosača stakla s donje strane. S obzirom da je s donje strane u kontaktu, mora biti osigurano dovoljno mjesta za širenje prema gore i u horizontalnom smjeru. Staklo nema pretjerano veliki koeficijent toplinskog rastezanja pa nije potrebno ostaviti previše prostora, ali je nužno ostvariti toplinsku dilataciju dovoljne distance jer puknuće stakla uslijed toplinskog naprezanja može biti opasno i skupo.

Upravo ovim razmacima između stakla i aluminijskih profila osigurava se otpornost pucanju stakla pri potresu, odnosno seizmička stabilnost. U standardnim testovima određeno je da stakleno aluminijske fasade mogu izdržati do 75 milimetara smičnog gibanja uzrokovanog potresima prije nego što staklo pukne ili fasada pusti vodu. Naravno, žilavost i elastičnost aluminiija također imaju velik značaj pri seizmičkoj stabilnosti.

Velik problem toplinskog naprezanja u stakleno aluminijskim fasadama predstavlja aluminiij. Kao što je već spomenuto, aluminiij ima izrazito velik koeficijent toplinskog rastezanja pa je kod njega potrebno osigurati dosta veliku toplinsku dilataciju. Četiri su pravila koja se primjenjuju pri toplinskom konstruiranju aluminiija u fasadama.

Prvo i najbitnije je upotreba čvrstog i kliznog oslonca. Aluminijski profil postavljen je najčešće na dva oslonca od kojih jedan obavezno mora omogućavati gibanje u smjeru normale na poprečni presjek profila.

Drugo pravilo je ostavljanje distance između dva profila u vertikalnom smjeru. Polja su vrlo često viša nego što su široka te će se aluminij puno više rastezati u vertikalnom smjeru. Ova dilatacija se ostvaruje tako da se jedan profil prekine na međukatnoj konstrukciji, gdje se najčešće nalaze i oslonci i na određenoj udaljenosti se nastavi drugi profil. Radi povećanja savojne krutosti fasade u komore profila umetne se spojnica, odnosno, profil jakog poprečnog presjeka. Na jedan profil spojnica se povezuje čvrsto, odnosno matičnim vijcima u okruglim rupama, a na drugi profil povezuje se klizno, odnosno samo je umetnuta, bez vijčanog spoja. Na slici 24. prikazan je detalj navedenog spoja, a kompletan detalj s opisom dan je u prilogu.



Slika 24. Detalj spoja dvaju vertikalnih profila

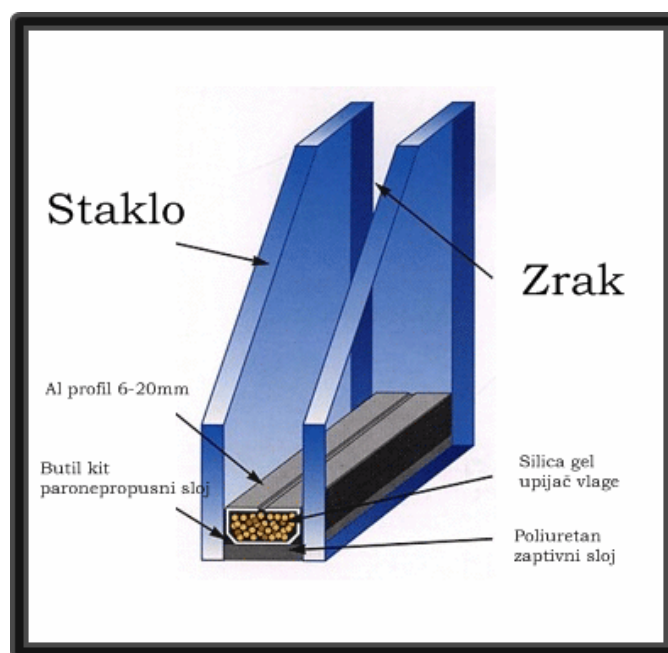
Treće pravilo je korištenje što je moguće kraćih profila. Primjerice, profil od 3 metra duplo će se manje linearno rastezati od profila od 6 metara. Najčešće visine između katova, odnosno između oslonaca fasade iznosi 3,5 do 4 metra te se prema toj duljini i temperaturnim izmjenama lokacije ugradnje mora konstruirati dilatacija.

Četvrto pravilo je omogućavanje hlađenja profila ventilacijom. Polja koja su u interijeru nekako zatvorena ne dobivaju hlađenje iz zgrade, već im se mora umjetno omogućiti ventiliranje zraka. To se ostvaruje izradom elongiranih elipsastih rupa na nosivim profilima iza stakla na takozvanim parapetnim poljima, odnosno onima koja su nevidljiva interijeru, na kojima se nalaze oslonci fasade. Bitan detalj je napraviti više rupa u gornjoj zoni nego u donjoj kako bi zrak mogao brže izlaziti van, time stvarajući potlak u prostoru iza stakla i omogućavajući stalnu ventilaciju.

2.3.3.4. Toplinska izolacija

S obzirom da su stakleno aluminijske fasade granica interijera i eksterijera, najviše topline iz zgrade prolazi kroz njih te je neophodno da imaju dobra izolacijska svojstva. Ideja toplinske izolacije je prekid „toplinskog mosta“, odnosno odvajanje vanjske i unutarnje plohe nekog materijala toplinskim izolatorom. Iako je aluminij puno bolji vodič topline od stakla, preko stakla se puno više toplinske energije gubi nego preko aluminijske fasade.

Rješenje ovog problema je IZO staklo, čija je najčešća izvedba prikazana na slici 25. IZO staklo izrađuje se spajanjem dvije ploče stakla (tipova prema poglavlju 3.1 ovog rada). Stakla se ne spajaju jedno na drugo, već se između njih postavlja distancer, koji je najčešće šuplji aluminijski profil, a takav distancer ispunjava se granulama silike, čija je svrha upijanje vlage. Između aluminijskog profila i stakla stavlja se butil – ljepilo dobrih izolacijskih svojstava. Prostor između stakla ispunjava se do 90% s argonom koji, prilikom punjenja, istiskuje zrak sve dok ga ne ostane samo 10%. IZO staklo se s vanjske strane završuje poliuretanskim ljepilom.



Slika 25. Dvoslojno IZO staklo

Na neprovidnim poljima, odnosno onim poljima iza kojih nije direktno interijer, iza stakla ostavlja se sloj zraka za ventiliranje i na zid se postavlja mineralna vuna. Mineralna vuna vrhunski je izolator i jedan od najčešće primijenjenih izolacijskih materijala u građevini. Sve navedeno vidljivo je na slici 24. ovog rada.

Izolacija aluminijske fasade ostvaruje se ubacivanjem plastičnog profila između vanjske i unutarnje stijenske profila. Materijali za ostvarivanje termo prekida su najčešće PVC (polivinilklorid) ili PA (poliamid). Bitno je izraditi plastični profil jakog poprečnog presjeka kako sveukupni „termo“ profil ne gubi mehaničku stabilnost. Primjenom ovakvih profila, pojavljuje se anizotropnost materijala, stoga je vrlo bitno imati pravilne alate za izračun statičkog momenta tromosti materijala. Primjeri ovakvih profila prikazani su na slici

2.3.3.5. Otpornost na udarni lom

Staklenu aluminijsku fasadu moraju biti ispitane na udarni lom. Aluminijski je veoma žilav i duktilan materijal te je otpornost na standardne mehaničke udare na vrlo visokom nivou. Staklo, je s druge strane jako krhko i krut materijal te je vrlo velika opasnost puknuća pri mehaničkom udarcu. Ovaj problem rješava se primjenom kaljenog i/ili laminiranog stakla



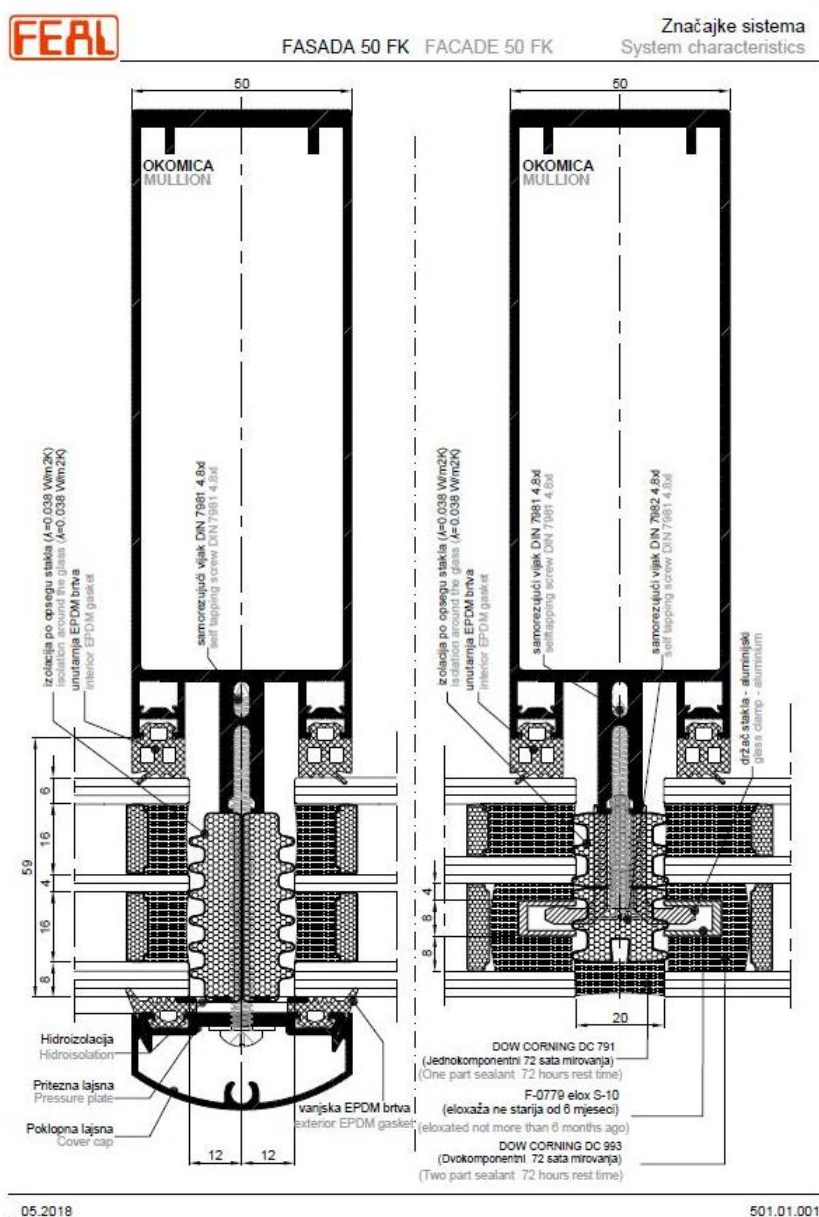
Slika 26. Ispitivanje na udarni lom stakla

2.3.4. Tipovi stakleno aluminijских fasada

Tijekom godina korištenja aluminijских profila za izradu podkonstrukcije ovješениh staklenih fasada, dva su tipa sustava aluminijских profila najčešće primjenjivana radi svoje jednostavnosti rada, kvalitetnih rješenja spajanja i dobre nosivosti. To su sustavi za kontinuirane fasade i element fasade.

2.3.4.1. Kontinuirane fasade

Kontinuirane fasade (eng. *Stick curtain wall*) najčešće su primjenjivane fasade u građevinskoj industriji. Sustavi profila za kontinuirane fasade sastoje se od profila vertikale (eng. *mullion*) i profila horizontale (eng. *transom*) povezanih nekom vrstom spojnih profila. Presjek kontinuirane fasade prikazan je na slici.



Slika 27. Prikaz presjeka kontinuirane fasade

S područja estetike, kontinuirane fasade su veoma svestrane. Na slici 27. vidimo različite tipove vanjskog izgleda fasade. S lijeve strane slike je klasični sustav „kapa-potkapa“ koji koristi pričvrstni profil koji se vijcima pričvršćuje u vertikalni profil, a služi za pridržavanje stakla na fasadi te osiguranje brtvljenja. Na desnoj strani nalazi se tip kontinuirane fasade pod nazivom strukturalna fasada. Razlog tog naziva jest zatvaranje fuge između stakala strukturalnim trajno elastičnim silikonom, tako osiguravajući brtvljenje. U ovom slučaju staklo se za fasadu pridržava takozvanim „leptir“ profilima koji se umetnu u utor u poliuretanskom ljepilu IZO stakla i vijcima pričvrste za vertikalni profil.

Ovo nisu jedine varijante vanjskog izgleda kontinuirane fasade. U prilogu je dan izvadak iz kataloga proizvođača s izborom ukrasnih vanjskih profila za sustav „kapa-potkapa“.

Kontinuirane fasade zahtijevaju više vremena i rada prilikom ugradnje nego pri strojnoj obradi profila u proizvodnom pogonu. Prema istraživanjima tržišta, cijena radnog sata montera je veća nego radnika u proizvodnji. Iz toga slijedi da je kontinuirana fasada vremenski i financijski više isplativa na nižim i manjim objektima nego velikim neboderima. Na slici 28. prikazana je zgrada s kontinuiranom fasadom.

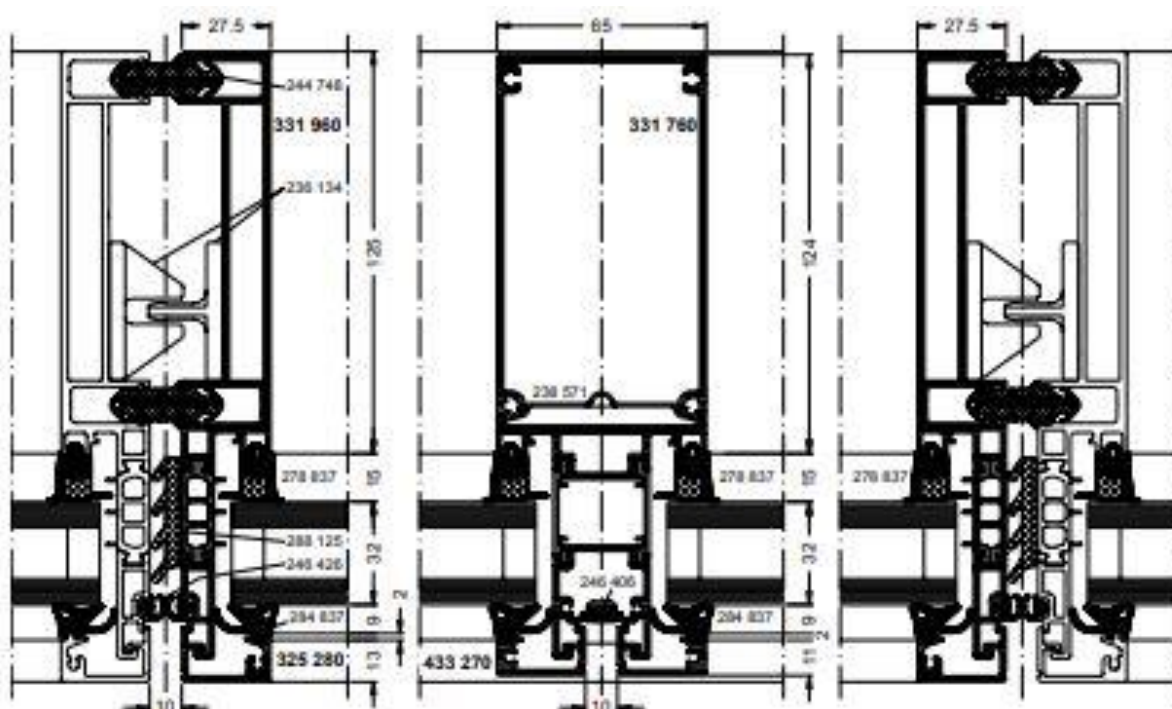


Slika 28. Kontinuirana fasada

2.3.4.2. Element fasade

Samonosiva jednostruka ili dvostruka element fasada (eng. *Unitised curtain wall*) je toplinski izolirana višeslojna konstrukcija za višekratne objekte i sastoji se od pojedinačnih modula (E-element) koji se gotovi dopremaju na gradilište. Tako radionički predgotovljeni elementi osiguravaju brzu montažu i maksimalnu kvalitetu kroz kontrolu u proizvodnom pogonu te kvalitetnim rješenjima montažnih spojeva. Montaža zahtjeva gotovo minimalan rad na terenu. Nakon izrade čeličnih sidara na armirano betonskoj konstrukciji, za montažu je potreban samo kran, tj. dizalica. Vertikalni i horizontalni brtveni EPDM ulošci nasjedanjem u alu profile pri montaži osiguravaju pored krutosti i nužnu mogućnost horizontalnih i vertikalnih pomaka (dilatiranja) uslijed različitih linearnih koeficijenata istezanja materijala pri temperaturnim razlikama.

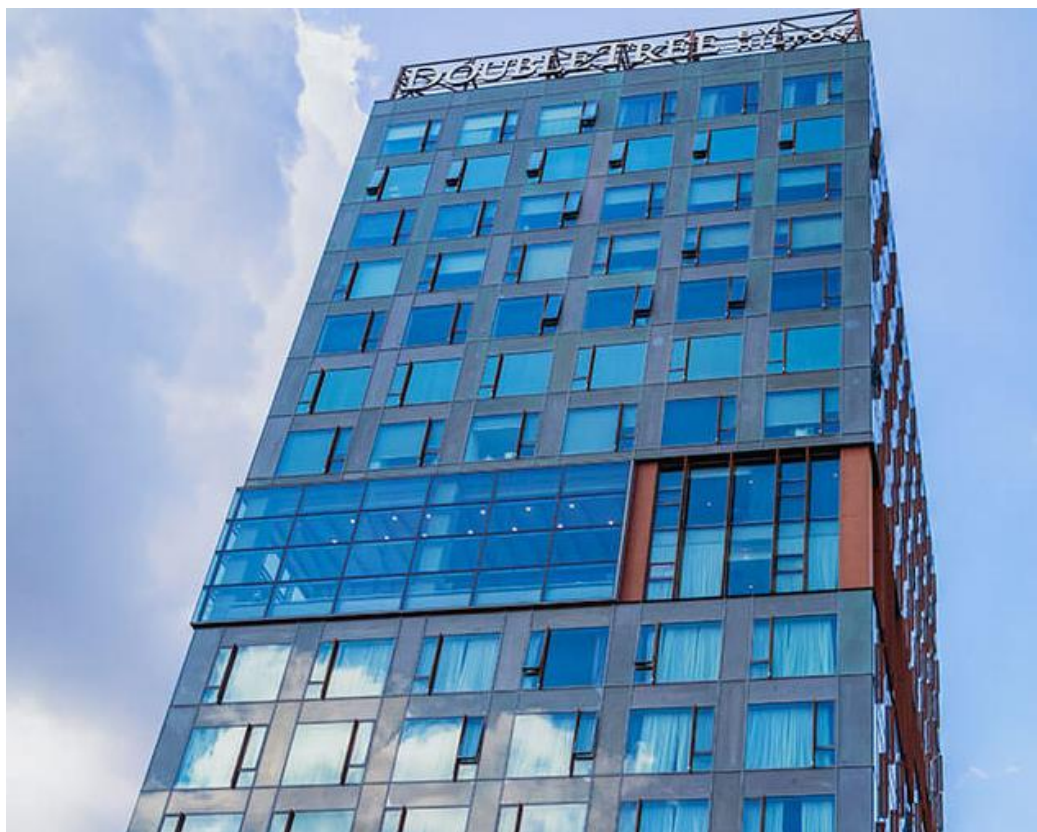
Element fasada zahtjeva puno više rada i vremena pri strojnoj obradi profila u proizvodnom pogonu nego pri montiranju. Iako je u prošlom poglavlju spomenuto da je istraživanje utvrdilo da je veća cijena radnog sata radnika na montaži nego u proizvodnji, element fasada ipak je skuplja pri izradi manjih količina od kontinuirane. Razlog tome je složeniji sustav profila i velika količina strojne obrade profila element fasade. No, pri izradi nebodera, element fasada je neizbježna jer se puno brže montira, time omogućavajući bolju dinamiku gradilišta i manje skupog vremena radnika na montaži. U nastavku, na slici 29. prikazan je presjek jednog sustava aluminijskih profila za element fasade, na slici 30. element pri ugradnji i slika 31. prikazuje zgradu DoubleTree by Hilton u Zagrebu koja je cijela izvedena s element fasadom.



Slika 29. Presjek element fasade



Slika 30. Element fasade pri ugradnji



Slika 31. DoubleTree by Hilton

2.4. Suvremeni razvoj

Staklene ovještene fasade u svom su začetku bile najsuvtremeniji napredak u građevinskoj industriji u tom dobu. Danas, 160 godina nakon izvođenja prve ovještene staklene fasade, neboderi sa stakleno aluminijским ovještenim fasadama još uvijek pomiču granice primjene suvtremenih tehnologija. Radi velike mogućnosti korisne primjene i kombiniranja estetike i funkcionalnosti, stakleno aluminijске fasade omogućuju raznovrsnu primjenu inovacija u svom razvoju. U ovom poglavlju prikazat će se najbitnije inovacije u pogledu energetske učinkovitosti koja obilježava 21. stoljeće. Na slici 32. prikazana je jedna suvtremena stakleno aluminijска fasada.



Slika 32. Elbphilharmonie

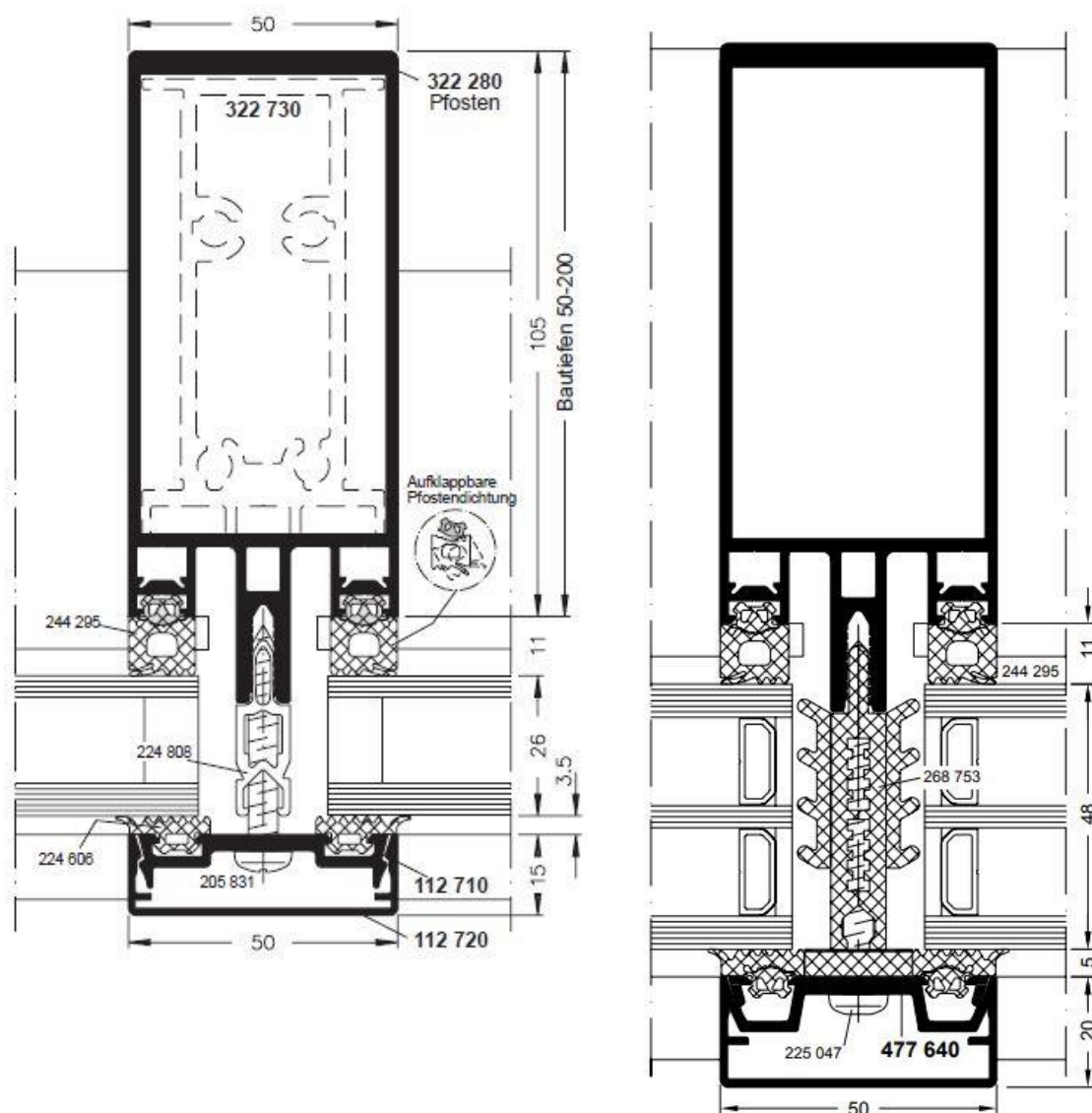
2.4.1. Visoko toplinski izolirana stakleno aluminijска fasada

Povećavanjem svijesti o energetscoj potrošnji, nastala je nužnost za smanjenjem toplinske provodljivosti stakleno aluminijских fasada. U „zlatno doba“ primjene stakleno aluminijских fasada, otprilike 70-ih godina prošlog stoljeća, električna i toplinska energija u SAD-u bile su vrlo jeftine te se taj vremenski period naziva „vrijeme besplatne energije“. Usljed otkrića o štetnom djelovanju industrije i civilizacije na okoliš, neophodan je postao održivi razvoj. Jedna od značajki održivog razvoja je upravo manja potrošnja energije tijekom faze korištenja životnog ciklusa fasade.

Kako bi se poboljšala toplinska izolacija staklenih fasada, uvedeno je prekidanje toplinskog mosta pomoću materijala koji imaju dobra izolacijska svojstva, kao PVC. Prije ovog izuma, aluminijski profili s vanjske strane fasade i unutarne bili su u direktnom kontaktu, time omogućujući praktički jednolik prijelaz topline između interijera i eksterijera.

Također, primjena IZO stakla značajno je smanjila potrošnju toplinske energije u neboderima sa stakleno aluminijskim fasadama. Primjena dvostrukih IZO stakla u odnosu na jednostruko, mogla je smanjiti potrošnju energije za 15%. Korištenjem troslojnih IZO stakala s Low-E premazima omogućuje uštedu još 20% energije.

Suvremeniji razvoj rješenja za poboljšanje toplinske izolacije stakleno aluminijskih fasada uključuje primjenu trostrukih IZO stakla, većih prekida toplinskih mostova te primjenu dodatnih izolacijskih materijala oko rubova stakla. Na slici 33. s lijeve strane vidljiv je presjek kontinuirane fasade iz 2005., a s desne iz 2020. godine. Dakle u 15 godina vidi se značajno povećanje u količini izolacijskih materijala.



Slika 33. Razlika u toplinskoj izolaciji

2.4.2. *Recikliranje*

Aluminij je teoretski bekonačno reciklabilan materijal. Postupak recikliranja aluminija veoma je jednostavan, korišteni aluminij se tali i iz njega se vade nečistoće. Nakon toga se ponovno lije u ingote i koristi za daljnju obradu. Prilikom postupka recikliranja, aluminij ne gubi svoja korisna mehanička i antikorozivna svojstva kao neki polimeri, već je konzistentan iz jednog životnog ciklusa u drugi.

Proces recikliranja aluminija koristi samo 5% energije koja je potrebna za stvaranje novog aluminija iz boksita. To uzrokuje značajno smanjenje emisije stakleničkih plinova. Trenutno, sveukupno 75% svog aluminija ikad proizvedenog, još uvijek je u opticaju. Aluminij također i indirektno djeluje na smanjenje štetnih emisija. Naime, njegova mala težina uzrokuje smanjenje potrošnje nekih drugih materijala koji imaju štetna djelovanja na okoliš, npr. beton u konstrukciji, prilikom čije se proizvodnje stvori ogromna količina stakleničkih plinova.

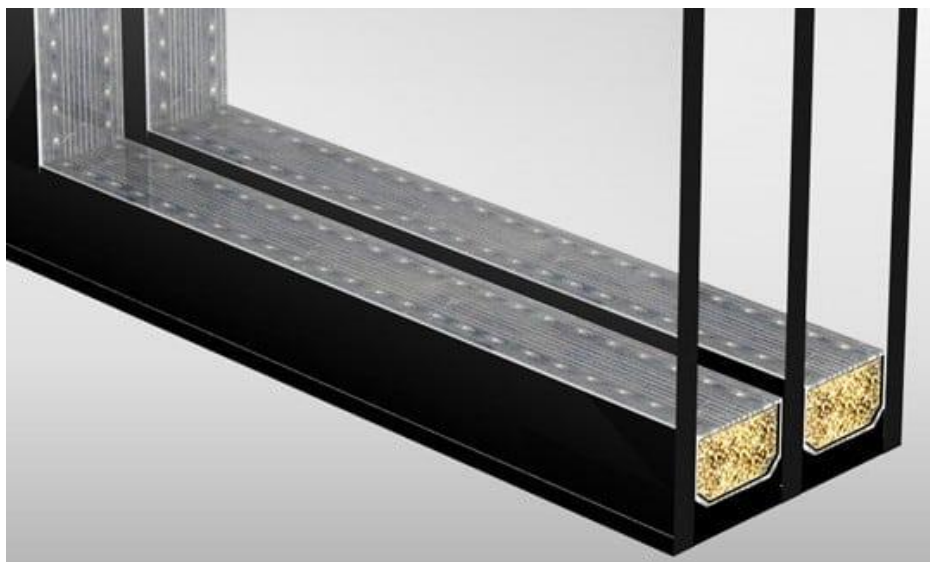


Slika 34. Simbol reciklabilnog aluminija

3. RAZVOJ NOVIH I UNAPREĐENJE POSTOJEĆIH SUSTAVA ALUMINIJSKO-STAKLENIH FASADA

Poduzeće ALU-KON d.o.o. u svojem intelektualnom vlasništvu posjeduje interno razvijene sustave profila za izvođenje element fasada (AK E65) i kontinuiranih fasada (AK 50). Sustavi su razvijeni početkom prošlog desetljeća specifično za projekt Green Gold u Zagrebu, koji je prikazan na slici 1. ovog rada. Navedeni sustavi zadovoljavaju sve norme, standarde i zakonske propise vezane uz ovještene fasade. Sustavi AK E65 i AK 50 razvijeni su za najsuvremenije zahtjeve koji su prevladavali u Republici Hrvatskoj početkom prošlog desetljeća. Ulaskom Republike Hrvatske u Europsku Uniju, standardi, zahtjevi i trendovi u građevini, nešto su se promijenili, posebno oni vezani uz energetske potrošnju.

U svrhu uštede toplinske energije, u sustavima aluminijsko-staklenih fasada počeli su se koristiti veći i kompliciraniji sustavi prekida toplinskog mosta, primjerice troslojno izolacijsko staklo.



Slika 35. Troslojno IZO staklo

Na slici 34. prikazan je presjek troslojnog IZO stakla, vidljivo je da su staklene ploče spojene distancerima, najčešće od aluminijske, koji je ispunjen „molekularom“, odnosno sitnim plastičnim kuglicama čija je svrha upijanje vlage i sprječavanje kondenzacije unutar stakla. Prostor između staklenih ploča kojeg ograđuje distancer je najčešće ispunjen Argonom, koji je bolji toplinski izolator od zraka. Kao što je navedeno u ovom radu, troslojno staklo može smanjiti potrošnju toplinske energije i do 15%.

Problem troslojnog IZO stakla jest taj što masa veća od dvoslojnog IZO stakla i do 30%. Ovo opterećenje direktno povećava naprezanja u nosivim aluminijskim dijelovima fasadnih sustava. Također, troslojno IZO staklo, radi dodavanja distancera i stakla, može biti i dvostruko deblje od dvoslojnog. Povećanje naprezanja, i dimenzija staklenih ispuna, postojeći problemi koji su uočeni prilikom korištenja postojećih sustava AK E65 i AK 50 te praćenje suvremenih trendova estetike razlozi su iniciranja unapređenja postojećih i razvoja novih fasadnih sustava u poduzeću ALU-KON d.o.o.

3.1. Element fasada AK E65

Poduzeće ALU-KON prvo je u Hrvatskoj na projektu Avenue Mall, 2006. godine u Zagrebu izvodilo suvremeni tip element fasade. Korišten je sustav Schüco USC 65, u to vrijeme, vrlo inovativan i vremenski i toplinski visokoučinkovit sustav element fasade. Na slici 36. prikazan je Avenue Mall. Neboder s desne strane slike izveden je od element fasade Schüco USC 65.



Slika 36. Avenue Mall

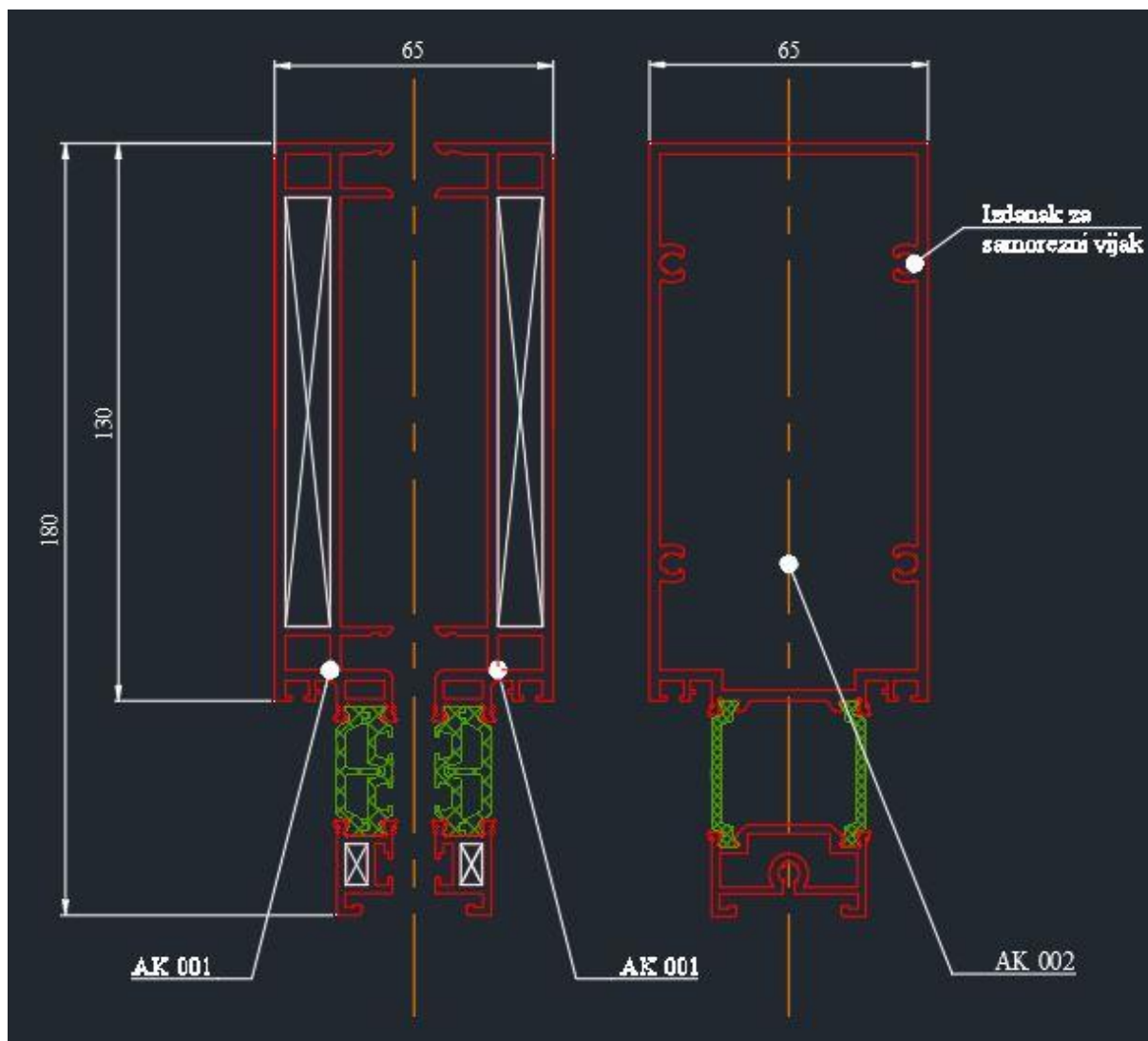
Dotadašnji sustavi element fasade funkcionirali su tako da se na nosivu konstrukciju zgrade, pomoću čeličnih ležajeva prikazanih na slici 22., postave vertikalni i horizontalni nosivi aluminijski profili te se u njih ubaci aluminijski okvir u kojem se nalazi staklo.

Suvremeni tip element fasade, kao što je Schüco USC 65, izvodi se na brži i efikasniji način. Na zgradu se, nakon precizne izmjere pozicija, postave fiksni dijelovi čeličnih ležajeva koji spajaju elemente sa zgradom. U međuvremenu se u proizvodnom pogonu obrade profili i staklena ispuna te se svi dijelovi sklope u predgotovljeni element. Takav element putuje na gradilište gdje se dizalicom podiže na poziciju i učvršćuje na zgradu. Ovakav sustav znatno ubrzava i pojeftinjuje postupak izvođenja fasade s obzirom da su uvjeti na gradilištu vrlo često teški i potrebno je više vremena utrošiti na neki rad na gradilištu nego u proizvodnom pogonu.

Nakon Avenue Malla, potaknuti iskustvom, u poduzeću ALU-KON stvorila se ideja za razvojem vlastitog sustava element fasade. Razlog tome bila je vrlo visoka cijena sustava

Schüco USC 65 i sve češće korištenje sustava element fasada u Hrvatskoj. Prilikom ugovaranja izvođenja kompletne fasade na projektu Green Gold, iskoristila se prilika za razvojem sustava AK E65. Sustav su razvili inženjeri ALU-KON-a, profili su ekstrudirani u Kini i sklopljeni u proizvodnom pogonu poduzeća ALU-KON. Naknadno je dogovoreno i izvođenje fasade projekta DoubleTree by Hilton, koji je vidljiv na slici 31., u istom sustavu.

Na slici 37. prikazana su dva osnovna nosiva sklopa profila u element fasadi AK E65. Profil AK 001 čini vanjski okvir elementa te su na dva susjedna elementa ti sklopovi profila postavljeni zrcalno jedan od drugog. Profil AK 002 čini unutarnju profilaciju elementa, odnosno podjelu po poljima po elementu. Profili AK 001 i AK 002 su na svojim spojevima okomiti te se spajaju samoreznim vijcima koji prolaze kroz profil AK 001 i urežu se u posebno konstruirane izdanke na profilu AK 002.

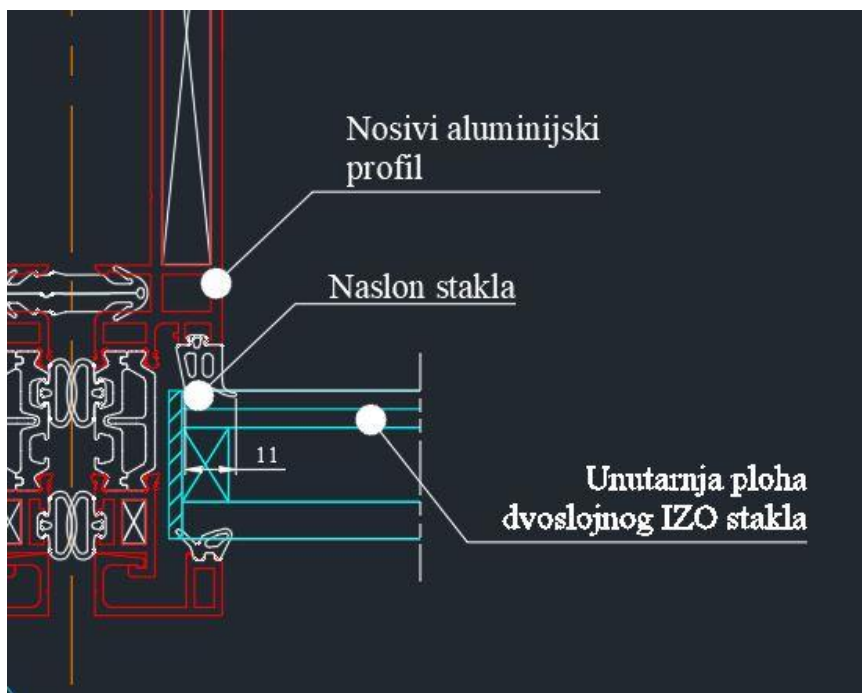


Slika 37. Sklopovi profila AK 001 i AK 002

Prilikom eksploatacije, uočena je potreba za konstrukcijskim preoblikovanjima određenih dijelova postojećeg sustava. U ostatku ovog poglavlja objasnit će se načinjena preoblikovanja i njihov razlog.

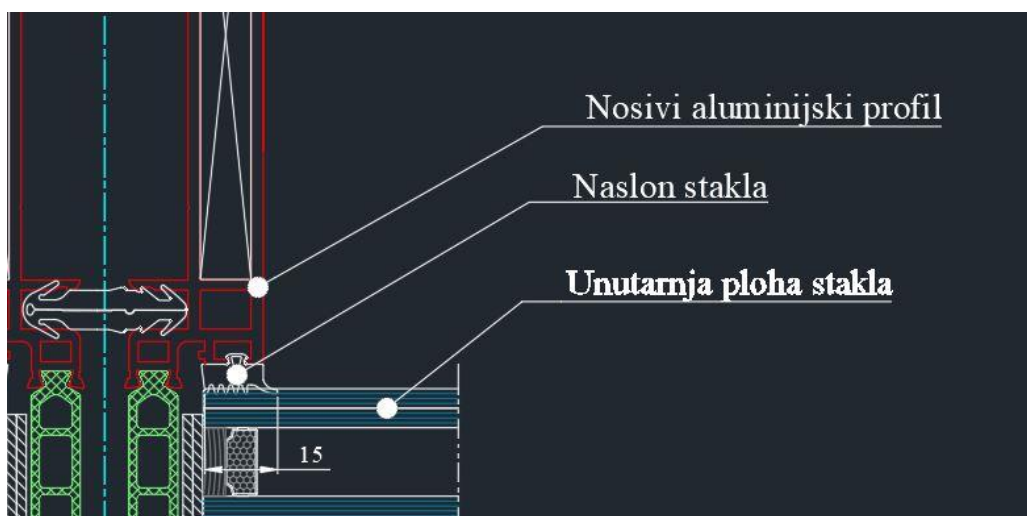
3.1.1. Povećanje naslona stakla

U poduzeću ALU-KON nastao je konsenzus da je površina naslona stakla na brtvu premala te da bi pri velikim opterećenjima, koja nastaju pri sklapanju predgotovljenog elementa, moglo doći do oštećenja, odnosno najvjerojatnije pucanja stakla, jer je unutarnje staklo najčešće najtanje i nije toplinski obrađeno, stoga najčešće i puca. Unutarnja ploha IZO stakla, oslanja se na EPDM brtvu koja je utisnuta u posebno konstruirani utor na nosivom aluminijskom profilu. Na slici 38. prikazan je presjek trenutnog sustava AK E65 te je naznačena i kotirana širina naslona stakla na brtvu i iznosi 11 milimetara.



Slika 38. Naslon stakla na brtvu

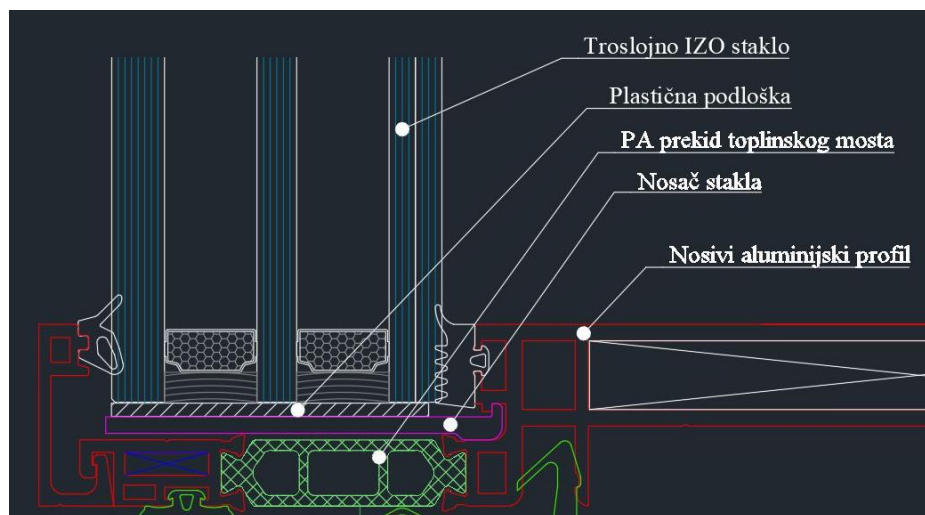
Kako bi se povećala površina nalijezanja stakla, potrebno je proširiti brtvu i prilagoditi nosivi aluminijski profil. Na slici 39. možemo vidjeti navedenu izmjenu. Dakle, naslon stakla u kod izmijenjenog profila iznosi 15 milimetara, što je povećanje od 50%. Iako se ne čini mnogo, smatra se da je dovoljno.



Slika 39. Novi naslon stakla

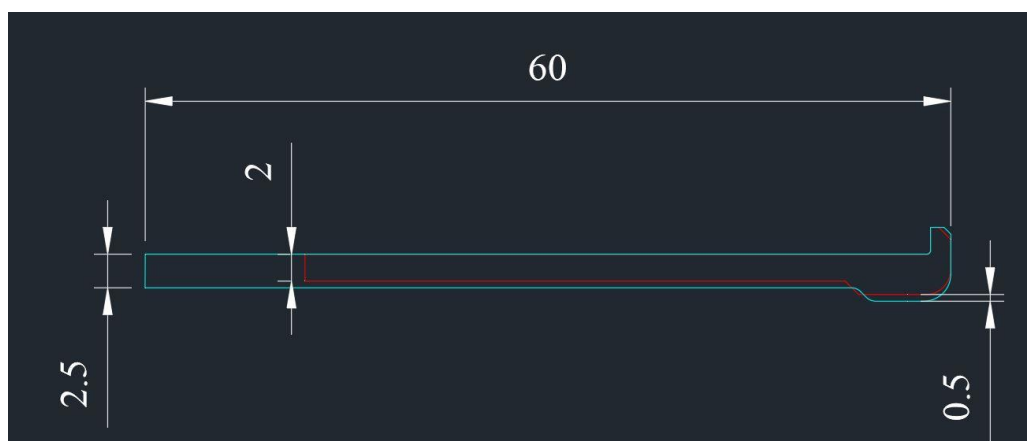
3.1.2. Modifikacija nosača stakla element fasade

Nakon učinjenih izmjena na nosivim aluminijskim profilima konstrukcije, bilo je potrebno promijeniti presjek nosača stakla. Nosač stakla prenosi opterećenje težine stakla direktno na nosivi aluminijski profil smanjujući opterećenje na vanjskom dijelu nosivog profila koji se sastoji od malog aluminijskog profila i poliamidnog profila koji služi za prekid toplinskog mosta. Nosač stakla svojom donjom stranom oslanja se na nosivi profil konstrukcije, a s gornje strane ima izdanak kojim se može zakačiti na drugi dio nosivog profila konstrukcije. Opisani princip prikazan je na slici 40. u nastavku.



Slika 40. Presjek nosača stakla

Na slici 41. prikazani su presjeci starog i novog profila nosača stakla. Stari je obojen crvenom bojom, dok je novi svijetloplavom. Nosač je na svim mjestima podebljan za 0,5 mm, produžen je kako bi mogao prihvatiti što deblja IZO stakla. Prilikom eksploatacije ovog nosača stakla znao se pojaviti problem. Naime, spoj poliamidnog i aluminijskog profila izvodi se uprešavanjem i savijanjem izdanaka na aluminijskom profilu koji čine utor kako bi kompletno obuhvatili poliamidni profil. Ukoliko operacija uprešavanja nije bila pravilno izvedena, nosač stakla se ne bi mogao ugraditi na svoje mjesto jer bi zapinjao. Radnici bi morali brusiti mjesto zadebljanja nosača stakla kako bi se mogao ugraditi, a time bi ga oslabili. Iz tog razloga, početak zadebljanja pomaknut je za 0,5 mm kako bi se osiguralo pravilno ugrađivanje nosača stakla bez njegovog oštećenja. Naprezanja, deformacije i pomaci ovog nosača stakla, u ovom su radu kasnije analizirani metodom konačnih elemenata.



Slika 41. Usporedba nosača stakla

3.1.3. Prekid toplinskog mosta

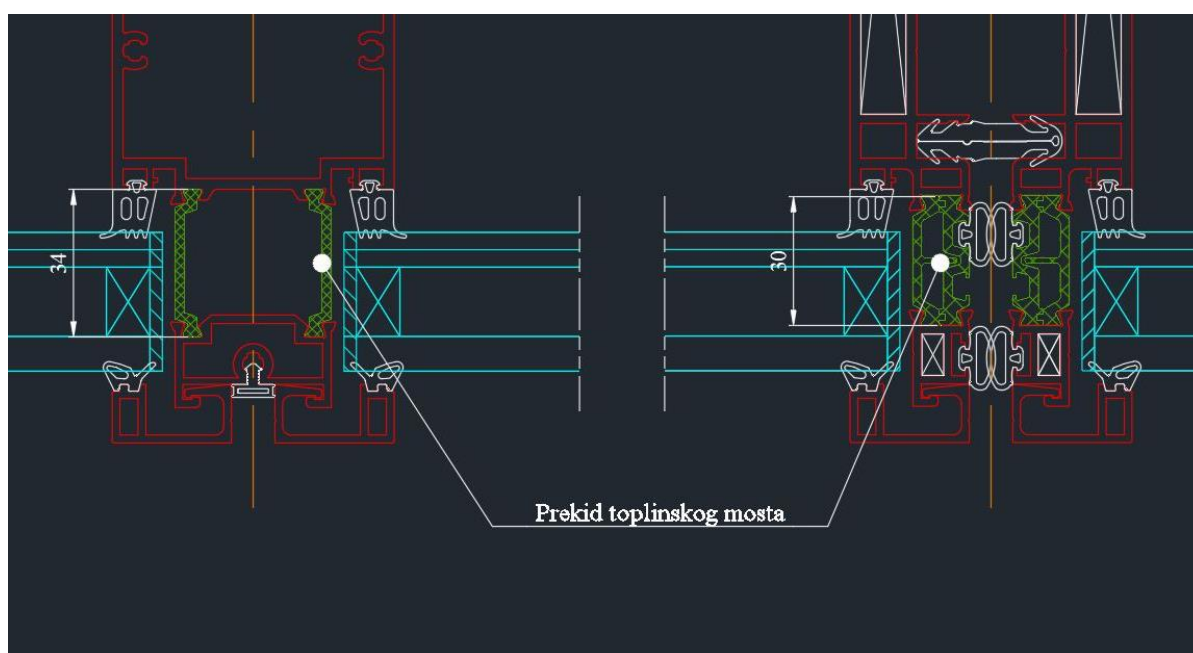
U modernim sustavima staklenih fasada, toplinska provodljivost profila izrazito je bitna i često spominjana tema. Veoma često, koeficijent toplinske provodljivosti profila je ono što, uz cijenu i rok, daje prednost jednom sustavu profila u odnosu na drugi. Upravo iz tog razloga, bilo je potrebno promijeniti i nadograditi postojeći profil prekida toplinskog mosta u fasadnom sustavu profila AK E65. U industriji aluminijsko-staklenih fasada i aluminijske stolarije, u samom profilu, prekid toplinskog mosta standardno se izvodi profilom od materijala PA 66. U tablici 2. prikazana je usporedba nekih svojstava između aluminijske legure EN AW 6060 T66 koja se koristi u ekstruziji nosivih aluminijskih profila i polimernog materijala PA 66 koji se koristi za profile prekida toplinskog mosta.

Tablica 2. Usporedba EN AW 6060 T66 i PA 66

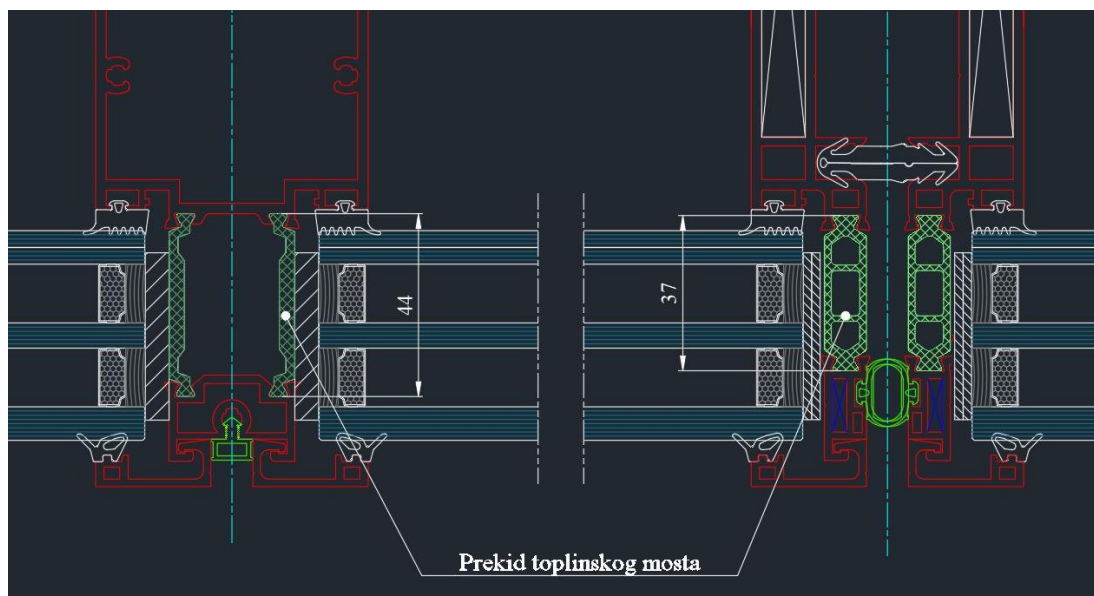
	EN AW 6060 T66	PA 66
Granica popuštanja $R_{p0,2}$ [MPa]	150	45
Toplinska provodljivost λ [W/mK]	200	0,25

Iz tablice 3. vidljivo je da EN AW 6060 T66 ima trostruko veći iznos granice popuštanja od PA 66, ali zato osamsto puta veći koeficijent toplinske provodljivosti, što znači da je PA 66 osamsto puta bolji izolator od EN AW 6060 T66. Iz navedenih podataka evidentno je zašto se koristi upravo PA 66 kao izolator, odnosno profil za prekid toplinskog mosta, ali je jednako tako vidljivo zašto se koristi profil nosača stakla kako bi se izbjeglo opterećivanje profila od PA 66.

Na slici 42. prikazani su stari presjeci profila za prekid toplinskog mosta, a na slici 43. novi i modificirani. Profili za prekid termo mosta prikazani su zelenom bojom, dok su nosivi aluminijski profili prikazani crvenom bojom, a staklo je prikazano plavom bojom.



Slika 42. Stari profili prekida toplinskog mosta



Slika 43. Novi profili prekida toplinskog mosta

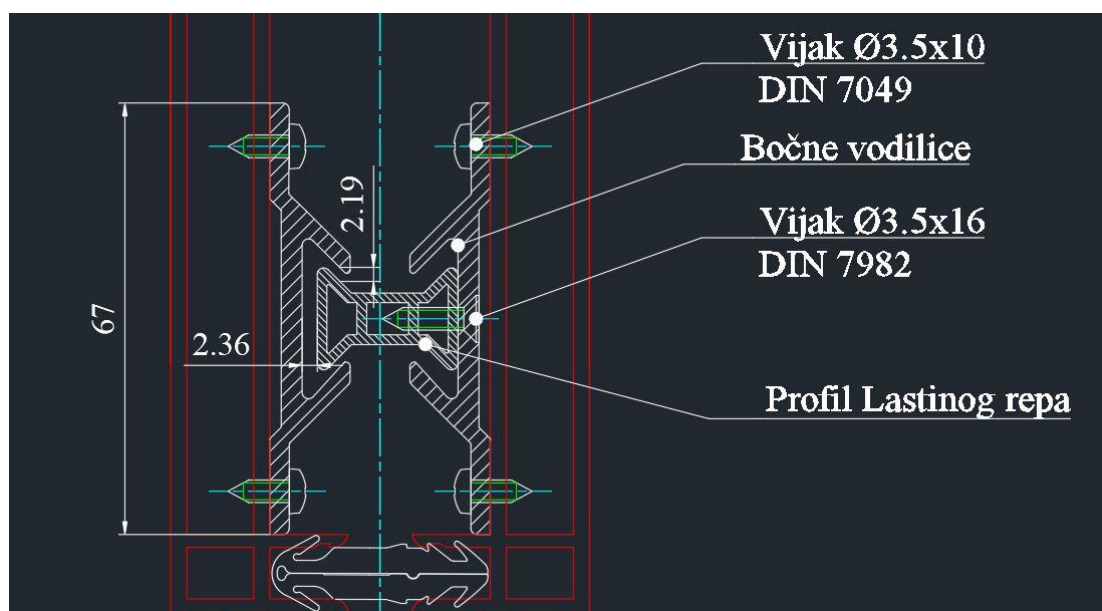
Iz slika je vidljivo da su profili prekida toplinskog mosta produljeni za 7-10 mm, odnosno otprilike 25% od svoje originalne duljine. To produljenje omogućuje prihvat većeg paketa stakla, u ovom slučaju je prikazano troslojno IZO staklo, ukupno 50 mm debljine. Zajedno, to povećanje paketa stakla i elongacija profila prekida toplinskog mosta uzrokovat će povoljniji koeficijent prolaznosti topline.

3.1.4. Bočne vodilice

Prilikom izvedbe fasade u sustavu Schüco USC 65 na Avenue Mallu, zaposlenici poduzeća ALU-KON uočili su nedostatak. Naime, prilikom otvaranja otklopnog prozora prema van, na nekim elementima prozor se više nije dao zatvoriti. Razlog tome je što se vertikalni nosivi aluminijski profil izvio prema unutra, ili uslijed opterećenja težine stakla kojeg je preneseno preko spoja horizontalnog profila na vertikalni. U tom trenutku, proizvođač profila Schüco nije imao kvalitetno rješenje problema pa je ALU-KON na svoju odgovornost vijcima povezo vertikalne profile dvaju susjednih elemenata time onemogućujući deformaciju. Ovo rješenje je previše ograničava gibanje elemenata i ne smatra se najboljim.

Pri razvoju i eksploataciji svog sustava element fasade AK E65, inženjeri ALU-KON-a osmislili su bolje rješenje. Koristilo se nekoliko komada aluminijskog lima debljine 5 mm od kojih je zadnji, vanjski, duži od ostalih. Na susjednom elementu, koristio se isti podsklop, zarotiran za 180 stupnjeva i pomaknut za visinu kraćih limova. Ovim podsklopovima, dva susjedna elementa su se zakačili jedan za drugi, iako je između dužih limova postojala zračnost od 2 milimetra u slučaju nepreciznosti na montaži ili gibanja uslijed toplinskih deformacija. Ovo rješenje također nije najkvalitetnije radi manjka preciznosti pri ugradnji i montaži elementa na zgradu, i radi neisplativosti pri velikoserijskoj proizvodnji radi dugog vremena proizvodnje.

Bilo je potrebno osmisliti rješenje koje će navoditi element pri montaži na pravilnu poziciju, osigurati minimalnu zračnost i onemogućiti izvijanje vertikalnog profila. Tijekom izrade ovog rada osmišljeno je rješenje na principu lastinog repa. Na slici 44. vidljiv je podsklop bočnih vodilica.



Slika 44. Bočne vodilice

Podsklop bočnih vodilica sastoji se od dva aluminijska profila s utorom u obliku lastinog repa koji su s ukupno 8 vijaka, 4 po jednoj vodilici, pričvršćeni na nosivi profil i jednog aluminijskog profila s dva izdanka u obliku lastinog repa koji je s dva vijka po visini pričvršćen za jednu bočnu vodilicu. Profil lastinog repa s jedne je strane vijcima spojen za a s druge strane je slobodan i ima zračnosti malo veću od 2 mm sa svih strana kojima ga okružuje profil vodilice. Ovakav oblik bočnih vodilica omogućava preciznu montažu elementa jednog kraj drugi, kako bi se dobio uniforman i ravan izgled fasade izvana i iznutra. S druge strane, omogućuje gibanje profila uslijed toplinskih deformacija i podešavanje pri montaži.

3.2. Strukturalna element fasada AK E65S

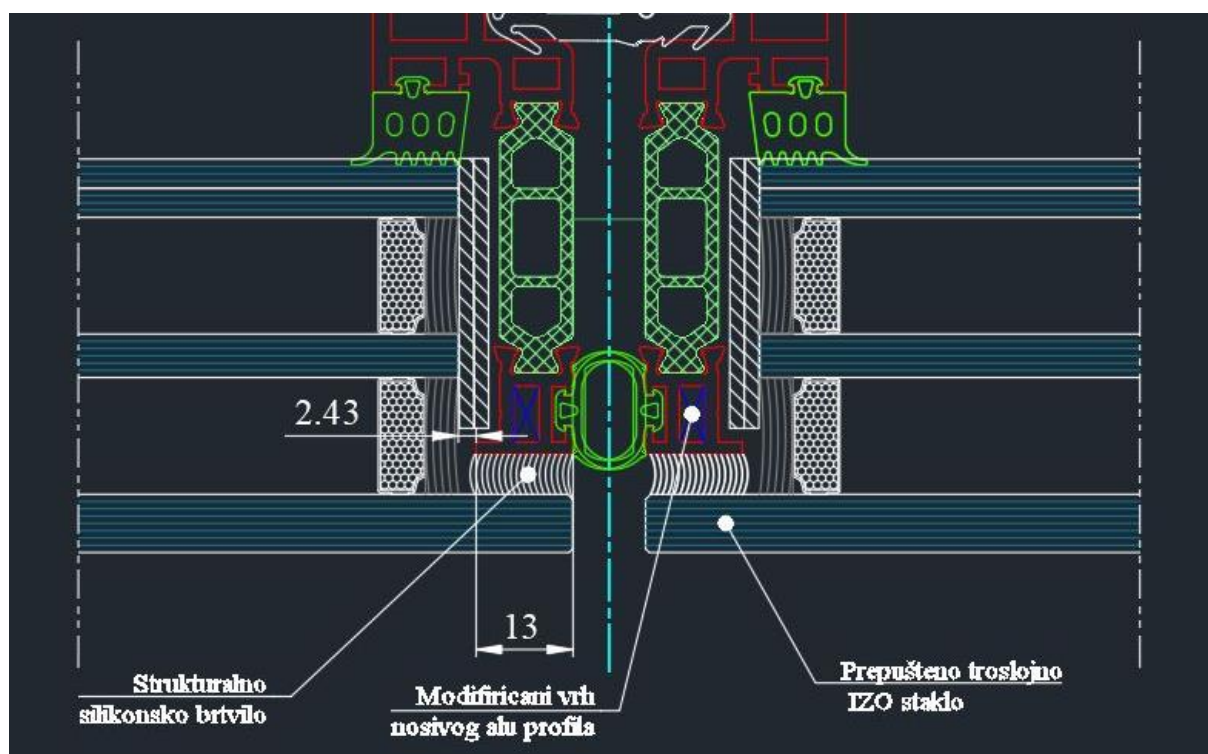
Strukturalna fasada trgovački je naziv za tip staklene fasade koje nemaju vidljive aluminijske dijelove s vanjske strane, već se vidi samo staklo. Fuge između staklenih polja mogu biti ispunjene gumenom brtvom ili silikonskim brtvilom koje je posebno namijenjeno za tu primjenu, odnosno otporno na atmosferilije. Na slici 45. prikazana je strukturalna fasada na zgradi sveučilišnog kampusa u Osijeku.



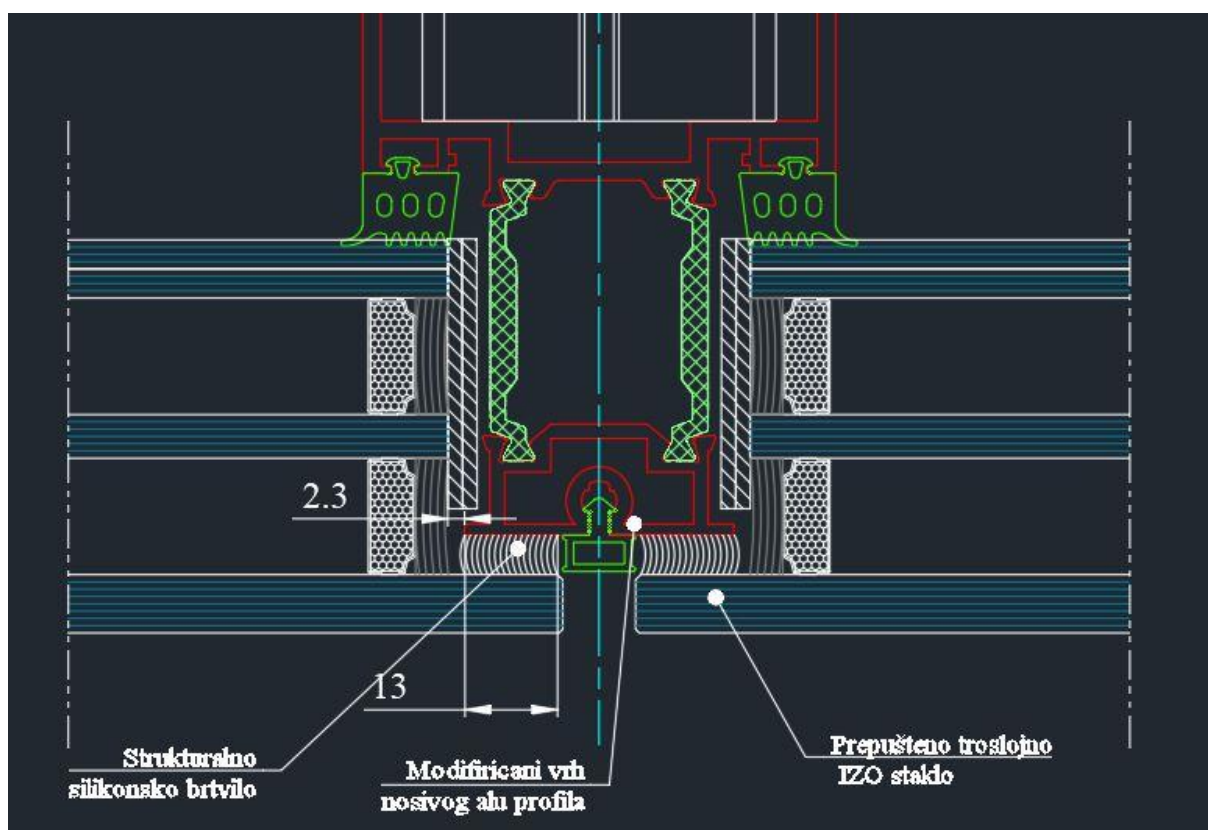
Slika 45. Strukturalna fasada

U suvremenoj arhitekturi strukturalne su fasade vrlo česta pojava radi uniformnog i bespriječnog vanjskog izgleda. Strukturalne element fasade rijetka su pojava na tržištu. Vrlo malo proizvođača daje gotova rješenja za strukturalne element fasade i vrlo često ta rješenja imaju izrazito loša termička svojstva jer profili nemaju prekid toplinskog mosta. U svrhu izdizanja od ostatka proizvođača sustava profila za stakleno-aluminijske fasade, u sklopu ovog diplomskog rada za tvrtku ALU-KON razvijena je strukturalna element fasada s dobrim toplinskim svojstvima.

Strukturalna element fasada AK E65S bazirana je na element fasadi AK E65, u smislu da se koriste isti nosivi aluminijski profili, isti ili slični polimerni profili za prekid toplinskog mosta i iste gumene brtve. Razlika je nastaje u vanjskom aluminijskom profilu. U element fasadi AK E65, vanjski aluminijski profil konstruiran je tako da se za njega zakači aluminijska letvica koja drži staklo na mjestu. U strukturalnoj element fasadi, s obzirom da je njen cilj eliminacija aluminijskih profila s vanjske strane fasade, letvica ne postoji pa se vanjski dio nosivog aluminijskog profila mora preoblikovati. Na slikama 46. i 47. vidljive su promjene koje su napravljene na aluminijskim profilima.



Slika 46. Modificirani profil okvira (varijacija na AK 001)



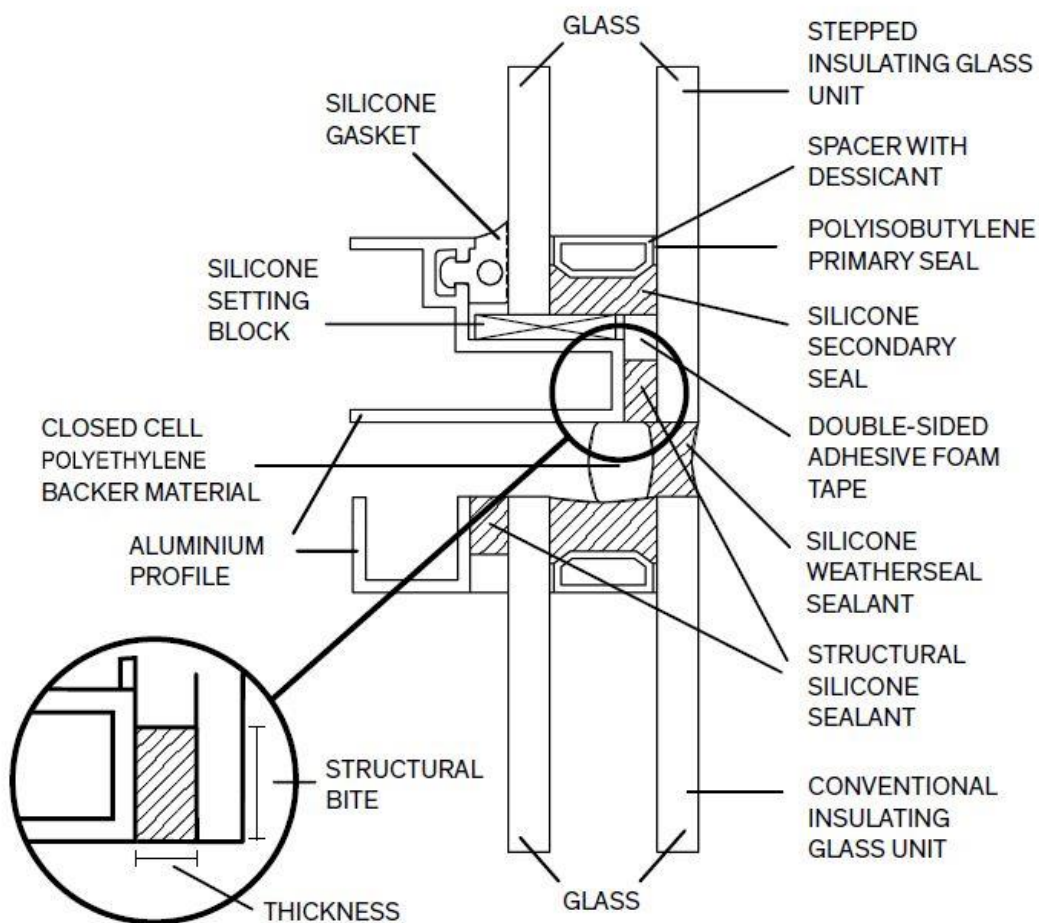
Slika 47. Modificirani profil ispune (varijacija na AK 002)

Ovakvim oblikovanjem profila dobila se zračnost između srednjeg i unutarnjeg stakla i aluminijskog izdanka za povećanje površine lijepljenja u iznosu malo većem od 2 milimetra. Na oko, ta vrijednost izgleda nedovoljna, ali u razgovoru sa zaposlenicima ALU-KON-a koji

imaju iskustva pri sklapanju elemenata i ugradnji stakla u okvir, ustanovljeno je da je ta zračnost dovoljna ukoliko se koristi dizalica s vakuumskim priključkom za staklo.

Druga vrlo bitna značajka ovakvog dizajna je varijanta strukturalnog stakla koje se naziva prepušteno staklo. Kod prepuštenog strukturalnog stakla, vanjsko staklo je šire i više od drugih stakala u IZO paketu. Svrha takvog tipa strukturalnog stakla je stvaranje površine koja se može lijepljenjem spojiti na aluminijski profil. Na slici 48. prikazana je shema takvog stakla iz priručnika za strukturalno ostakljivanje od Dow Corninga.

Typical Structural Glazing Detail



Slika 48. Shema strukturalnog lijepljenja

Prepušteno strukturalno staklo, Dow Corning opisuje s pojmom „Structural bite“ i u svom priručniku definirali su minimalnu potrebnu širinu takvog lijepljenog spoja u ovisnosti o opterećenju vjetra i minimalnoj širini stakla.

Ovim dizajnom profila strukturalne element fasade AK E65S dobivena je širina površine lijepljenja od 13 milimetara. Prema priručniku za strukturalno ostakljivanje od proizvođača strukturalnog ljepljiva Dow Corning, formula za minimalnu širinu lijepljenog spoja kod prepuštenog stakla glasi:

$$x = \frac{L \cdot W \cdot S}{2 \cdot 140}, \quad (3.1)$$

gdje su:

$x = 13 \text{ mm}$ – Širina površine strukturalnog lijepljenja,
 L – Kraća dimenzija stakla koje se lijepi [mm],
 W – Opterećenje vjetra [kPa],
 $S = 1,5$ – Faktor sigurnosti.

Iz ovih vrijednosti slijedi:

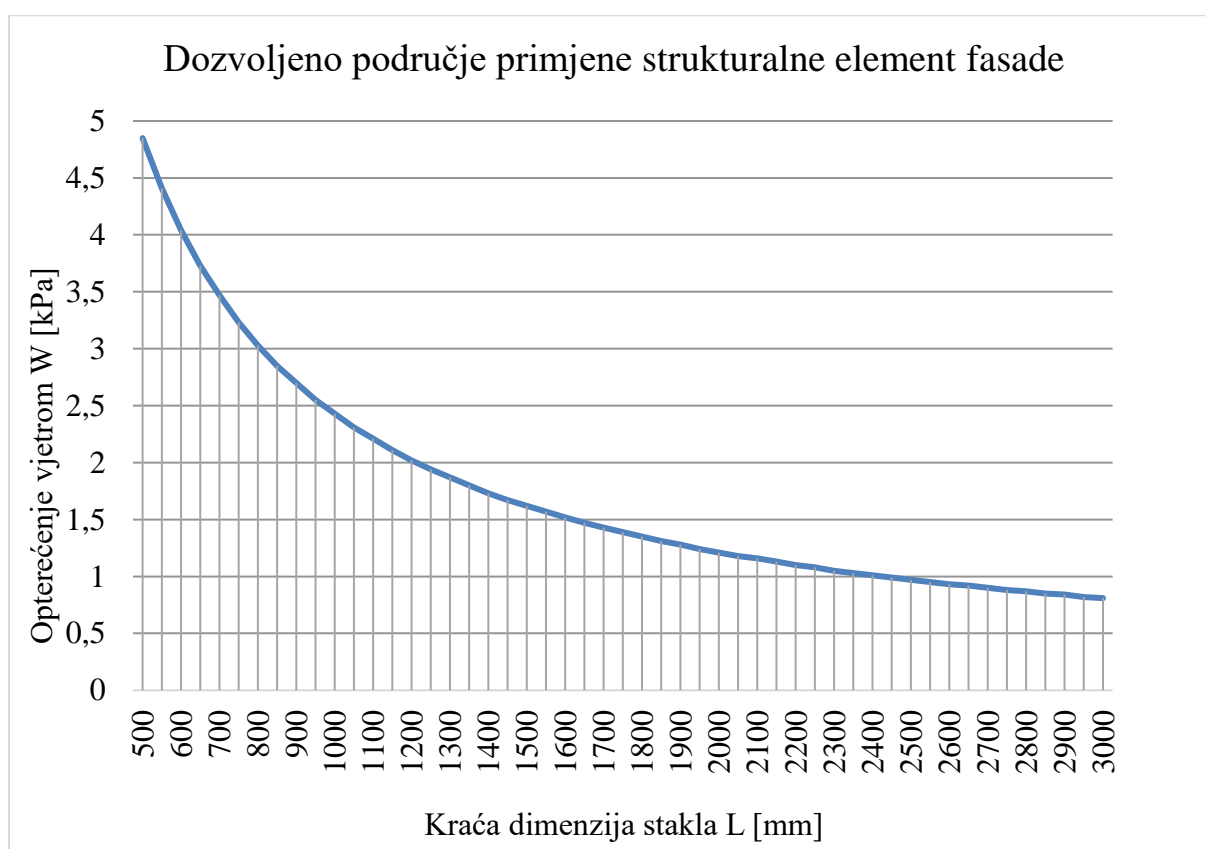
$$L \cdot W = \frac{x \cdot 2 \cdot 140}{S} = \frac{13 \cdot 2 \cdot 140}{1,5} \quad (3.2)$$

$$L \cdot W = 2426.$$

Kada se preformulira jednačba 3.2, dobije se hiperbola sljedeće jednačbe:

$$W = \frac{2426}{L}. \quad (3.3)$$

Na slici 49. prikazan je graf jednačbe hiperbole (3.3).



Slika 49. Graf dozvoljenog područja primjene strukturalne elemente fasade AK E65S

Graf sa slike 49., definiran jednačbom (3.3) i ulaznim podacima koji su definirani u ovom radu, prikazuje dozvoljeno područje primjene strukturalne elemente fasade. Područje primjene nalazi se ispod krivulje grafa, a bazirano je na širini lijepljenog spoja od 13 mm i faktoru sigurnosti 1,5, a ovisi o kraćoj dimenziji stakla koje se lijepi i vjetrovnom opterećenju.

Kao primjer, za poslovni neboder Eurotower u Zagrebu, jednu od najviših zgrada u Republici Hrvatskoj, za dimenzioniranje fasade koristilo se opterećenje vjetra od 1,0 kPa. Za vjetrovno opterećenje od 1,0 kPa, maksimalna manja dimenzija stakla na element fasadi AK E65S iznosi oko 2400 mm, što je izrazito dobra vrijednost, s obzirom da su vrlo često cijeli elementi te širine, a elementi se skoro nikad ne sastoje od samo jednog staklenog polja. Stoga je zaključak da je fasadni profil, s obzirom na površinu lijepljenja dobro konstruiran.

3.3. Kontinuirana fasada AK 50

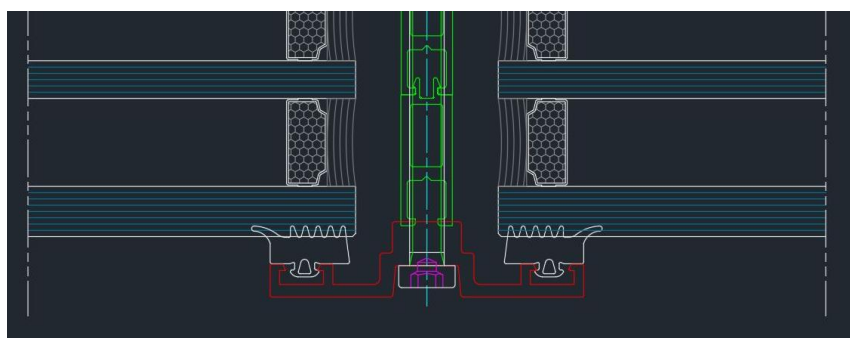
Kao što je već spomenuto u ovom radu, kontinuirane fasade najčešće su korišteni tip aluminijsko-staklenih fasada, radi svoje jednostavnosti i prilagodljivosti. Poduzeće ALU-KON od svog osnutka 1990. godine, izvodi kontinuirane aluminijsko-staklene fasade.

Ideja razvoja vlastitog sustava kontinuirane fasade stvorena je nedugo nakon početka konstruiranja sustava element fasade AK E65. Na projektu Green Gold uz veliku količinu element fasade po katovima, cijelo prizemlje i razine suterena obavijene su kontinuiranom aluminijsko-staklenom fasadom AK 50. S obzirom da je kontinuirana fasada AK 50 razvijena izrazito brzo i u kratkom roku, ima nekoliko nedostataka koji su uočeni prilikom prve eksploatacije. Ti nedostaci ne ugrožavaju stabilnost fasade, već su samo konstrukcijski propusti koji su samo financijski ili vremenski trošak. U nastavku ovog poglavlja objašnjeni su nedostaci i njihova konstrukcijska rješenja.

3.3.1. Sklop pokrovnog i pričvrstnog profila

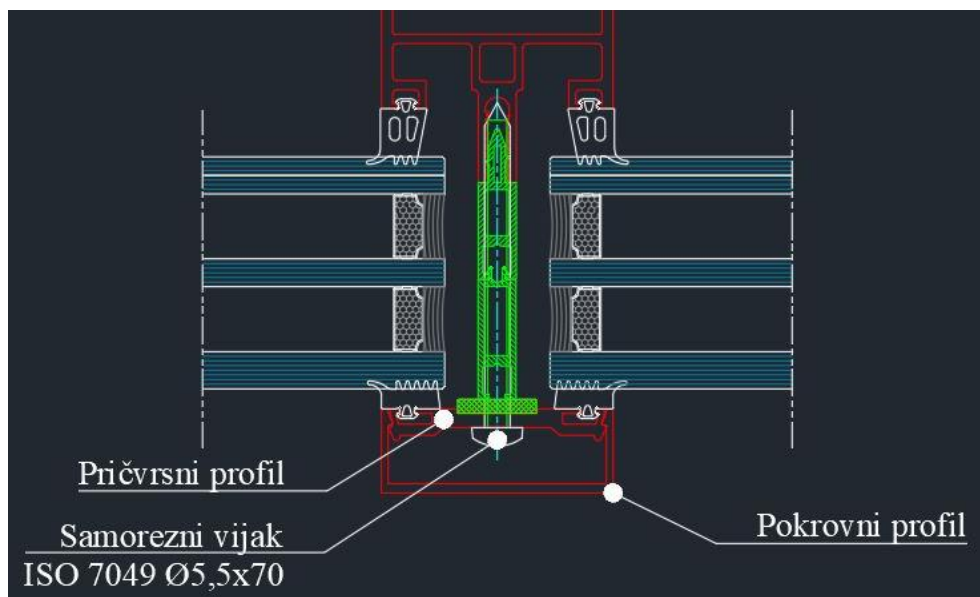
Dva su tipa kontinuiranih fasada, tip s pričvrstnim profilom s vanjske strane fasade koji pričvršćuje staklo za fasadu i strukturalni tip koji ima skriven način pričvršćivanja stakla u fugi između staklenih polja i s vanjske strane se vidi samo staklo. Pričvrstni profil može i ne mora imati pokrivni profil.

Pričvrstni profil bez pokrovnog profila naziva se „Omega“ profil i prikazan je na slici 50. u nastavku teksta. Pozitivna karakteristika ovog profila je specifičan izgled koji imitira postojanje okvira oko stakla. Podsjeća na element fasadu AK E65 s letvicama i na starije tipove element fasada, zvane „Grip fasade“ kod kojih je svako stakleno polje bilo u svom okviru. Negativne karakteristike su to što se mora koristiti poseban imbus vijak s niskom glavom i samoureznim navojem. Taj je vijak vidljiv s vanjske strane, a kako bi ga se sakrilo moralo bi se silikonskim brtvilom ispuniti područje u kojem se vijak nalazi, što vrlo često ispadne neuredno, skupo i pri velikoj količini se nikako ne isplati. Ovakav tip pričvrstnog profila vrlo se rijetko koristi te neće biti preoblikovan u sklopu ovog diplomskog rada.



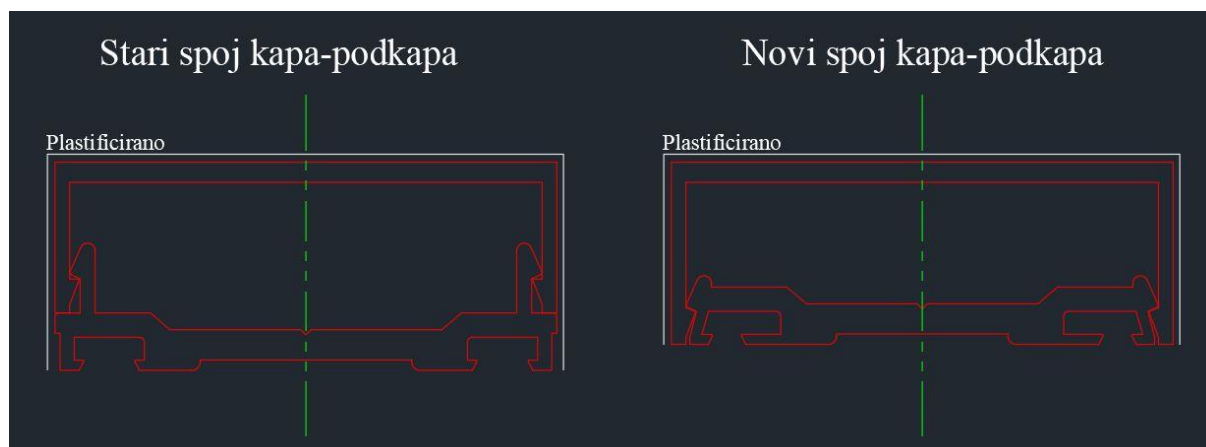
Slika 50. Omega profil

Druga verzija pričvrstnog profila je onaj s pokrovnim profilom, a sklop tih dvaju profila naziva se „kapa-podkapa“. Na slici 51. vidljiv je način pričvršćivanja stakla sa sklopom profila kapa-podkapa. Kod ovog tipa pričvrstnog profila, koristi se standardni vijak ISO 7049, a duljina se izabire prema paketu IZO stakla. Spoj pokrovnog i pričvrstnog profila bazira se na takozvanoj „klik“ metodi. Naime, i pokrovni i pričvrstni profil na sebi imaju male zaobljene izdanke. Ti izdanci namjerno ulaze u volumen drugog profila. Prilikom sklapanja, potrebno je stisnuti pokrovni profil na pričvrstni. Prilikom toga, pokrovni profil se elastično deformira prema izdanku pričvrstnog profila i pri ulasku na poziciju, izdanci su tako posloženi da onemogućuju odvajanje. Prilikom elastične deformacije pokrovnog profila natrag u nominalni oblik, nastane zvuk, prema kojem je takav tip spoja dobio ime.



Slika 51. "Kapa-podkapa" spoj

Na slici 52. vidljiva je usporedba između starog i novog sklopa pokrovnog i pričvrstnog profila. Nedostatak originalnog dizajna kape i podkape je taj što kapa ne pokriva cijelu odkapu, već se dio podkape vidi s vanjske strane. Radi toga, potrebno je plastificirati u istu boju i pokrovni i pričvrstni profil. Novi dizajn pokrovnog i pričvrstnog profila omogućuje kompletno prekrivanje pričvrstnog profila pokrovnim te pričvrstni profil postaje nevidljiv s vanjske strane i ne mora se plastificirati, što je velika logistička i financijska ušteda, posebno pri izvođenju aluminijsko-staklenih fasada velikih površina.



Slika 52. Usporedba starog i novog dizajna pokrovnog i pričvrstnog profila

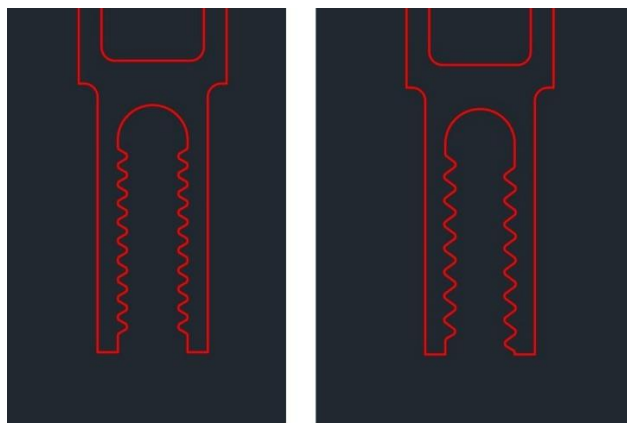
3.3.2. *Ekstrudirani navoj u nosivom aluminijskom profilu*

Pričvrtni profil pritišće staklo na nosivi profil pomoću vijčanog spoja. U ovom slučaju koristi se samorezni vijak promjera 5,5 mm prema normi ISO 7049 kao što je vidljivo na slici 51. u prethodnom poglavlju. Kako bi se olakšalo precizno uvijanje vijka na montaži i skratilo vrijeme potrebno za operaciju pritezanja vijka, u aluminijskom nosivom profilu, pri ekstruziji se naprave utori za navoj vijka. Nedostatak originalne serije profila AK 50 jest taj što su utori za navoj vijka simetrični s obzirom na središnju os profila, umjesto da su zamaknuti za korak navoja kako bi mogli pratiti navoj vijka. Iz tog razloga, vijak nikad nije mogao pravilno i pravocrtno pričvrstiti profil podkape, već je uvijek bio koso orijentiran i deformirao je stijenku profila na mjestu svog pričvršćenja što bi moglo izazvati veća i ozbiljnija oštećenja kao pucanje stakla. Na slici 53. vidi se deformacija stijenke profila koju je izazvao samorezni vijak.



Slika 53. Deformacija stijenke profila izazvana pritezanjem vijka

Kako bi se izbjegla ova pojava i osiguralo sigurno pričvršćivanje vijka, u sklopu ovog diplomskog rada, na nosivom vertikalnom i horizontalnom profilu kontinuirane fasade, navoj je s jedne strane stijenke zamaknut za pola koraka navoja vijka. Usporedba starog i novog ureza za navoj vijka u vertikalnom nosivom fasadnom profilu vidljiva je na slici 54. u nastavku. S lijeve strane je detalj starog ureza za navoj, a s desne novog.

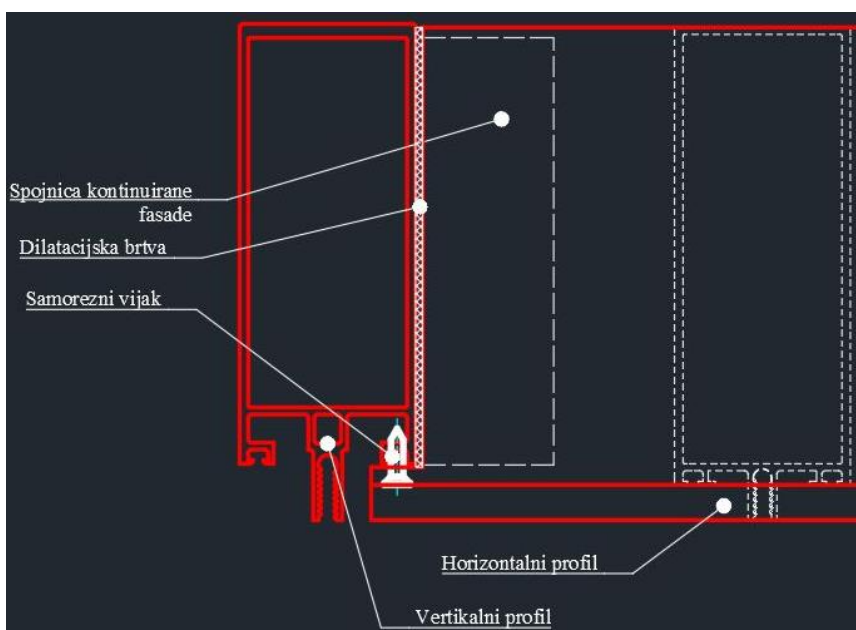


Slika 54. Usporedba ureza za navoje (lijevo stari urez, desno novi)

3.3.3. Klizna spojnica

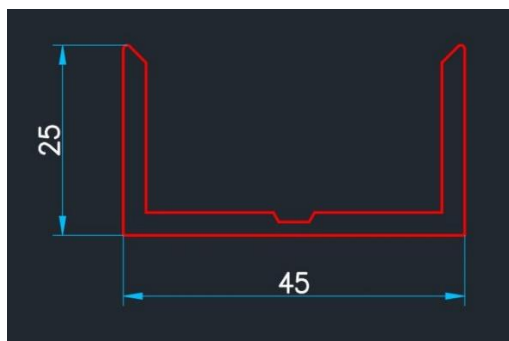
Kontinuirane aluminijsko-staklene fasade zahtijevaju vrlo malo obrade i rada u proizvodnom pogonu, a vrlo puno na montaži. S druge strane, aluminijsko-staklena element fasada ima vrlo ozbiljnu i kompliciranu obradu u proizvodnom pogonu koja uključuje linijske preše za uprešavanje profila, CNC obradne strojeve, velike dvoglave listne pile koje moraju imati mogućnost zakretanja i do 60 stupnjeva, iskusne i sposobne majstore zadužene za sklapanje elemenata i ostakljivanje, ali zato se montiraju veoma brzo i jednostavno. To je glavni razlog zašto se pri izvedbi fasada velikih nebodera obavezno izabire element fasada.

Kontinuirana fasada sastoji se od vertikalnih i horizontalnih profila. Horizontalni profili opterećeni su težinom stakala i, preko spojnice, prenose taj teret na vertikalne profile. Vertikalni profili se, uz prenošenje tereta stakla, ponašaju kao grede i preko čeličnih fasadnih ležajeva na zgradu prenose opterećenje koje vjetar i težina stakla izvršavaju na zgradu. Horizontalni profili uvijek imaju veću komoru od vertikalnih, kako bi mogli biti prepušteni preko vertikalnih tako se naslanjajući na vertikalni profil. Ovaj princip spajanja prikazan je na slici 55. u nastavku.



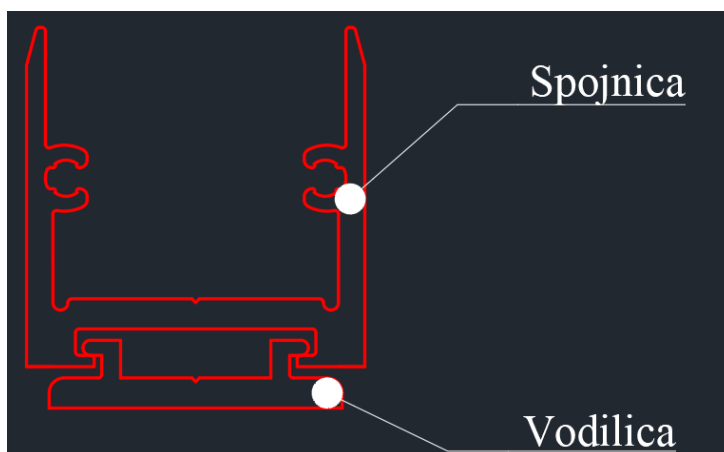
Slika 55. Spajanje horizontalnog profila na vertikalni

Pri konstruiranju originalne serije kontinuirane aluminijsko-staklene fasade AK 50, tadašnji razvojni inženjeri konstruirali su vrlo jednostavan profil spojnice horizontalnog i vertikalnog profila kontinuirane fasade. Takav dizajn profila spojnice, u obliku slova U, prikazan na slici 56., uvjetuje specifičan način montaže kolokvijalno zvan „ljestve“. Princip je da se na podu sastavi element od dvije vertikale i dvije ili više horizontala, ovisno koliko polja ima između dva vertikalna profila. Više takvih elemenata sklopi se pored mjesta ugradnje, zapravo svako drugo polje, i tako sklopljeni elementi osove se i vijcima povežu na čelične ležajeve, ali se ne pričvrste. Nakon što se jedan element osovi, a prije nego što se sljedeći podigne, na postavljeni element postave se horizontalni profili koji spajaju dva susjedna elementa. Zatim se osovi sljedeći element i horizontalni profili se nataknu na spojnice koje se nalaze na vertikalnom profilu sljedećeg elementa. Tek nakon što se osove tri ili četiri susjedna elementa, vijčani spojevi između aluminijskih vertikala i fasadnih ležajeva mogu se pritegnuti. Ovakav princip montaže jeftin je i poželjan na prizemljima zgrada gdje su vrlo često samo dva horizontalna profila između vertikalnih, ali izrazito je nespretna i komplicirana pri montaži fasada koje prelaze prizemlje i prvi kat.

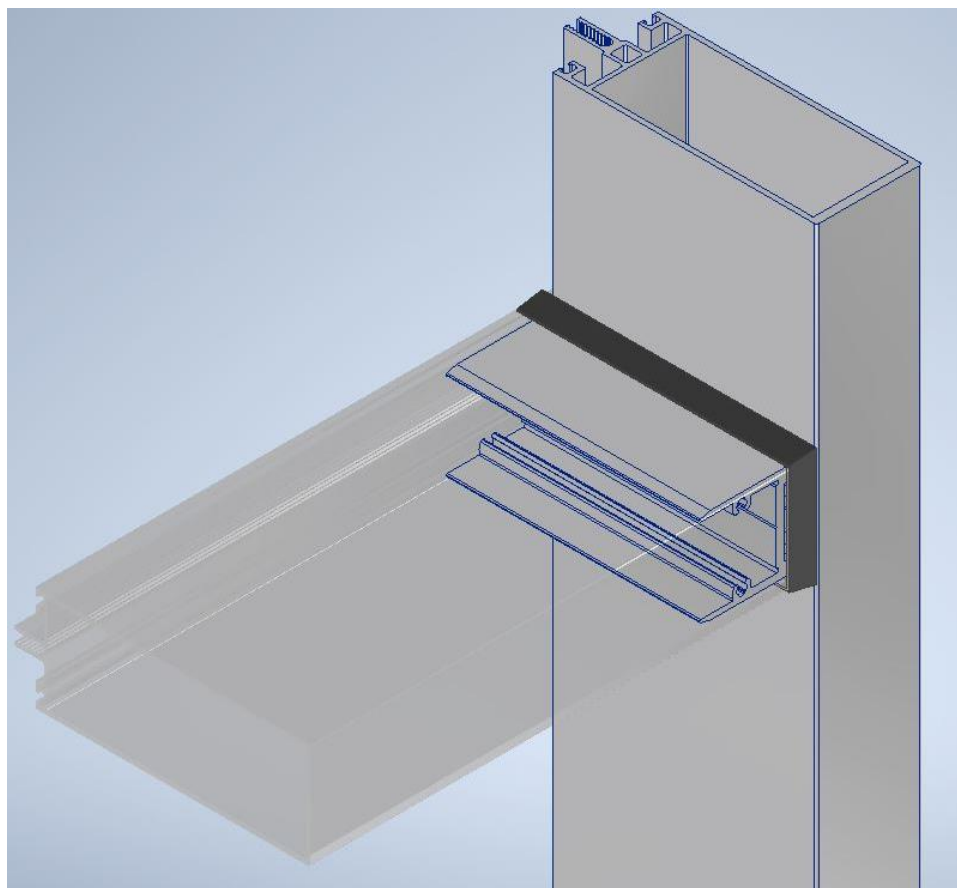


Slika 56. Fiksna spojnica za sistem montaže "ljestve"

Za kontinuirane aluminijsko staklene fasade koje obuhvaćaju više katova, neophodno je koristiti sistem kliznih spojnica. Sistem kliznih spojnica svojim dizajnom omogućuje postavljanje svih vertikalnih profila fasade i njihovo učvršćivanje na poziciju, neovisno o horizontalama. Na vertikalnim profilima nalaze se vodilice za spojnice sa utorima za te vodilice koje su ubačene u unutrašnjost horizontalnih profila. Horizontalni profili tako su konstruirani da se mogu prepustiti preko vertikalnih. U sklopu ovog diplomskog rada, razvijen je sklop profila klizne spojnice za kontinuiranu aluminijsko-staklenu fasadu AK 50. Na slici 57. prikazan je presjek profila sklopa klizna spojnica, a na slici 58. 3D model spoja kliznom spojnicom.

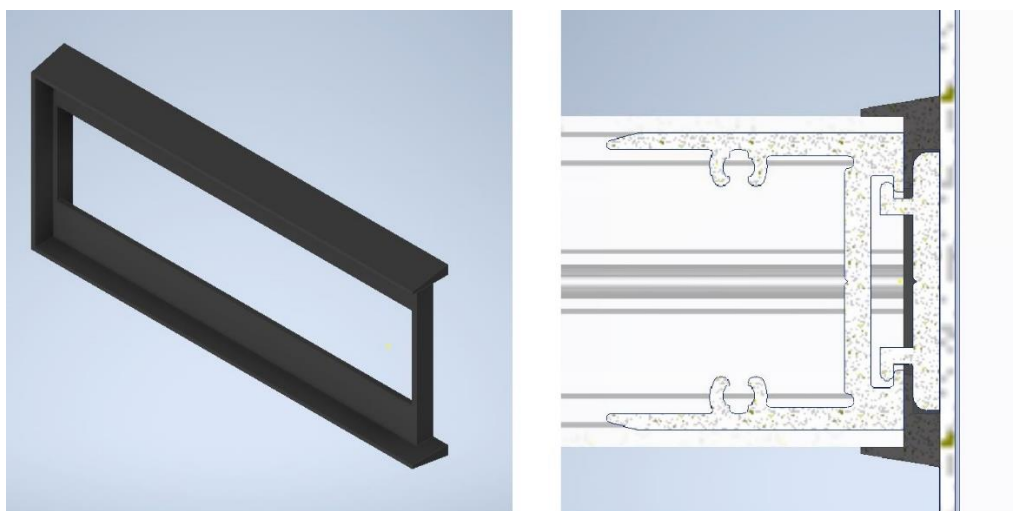


Slika 57. Sklop klizne spojnice



Slika 58. 3D model spoja klizne spojnice

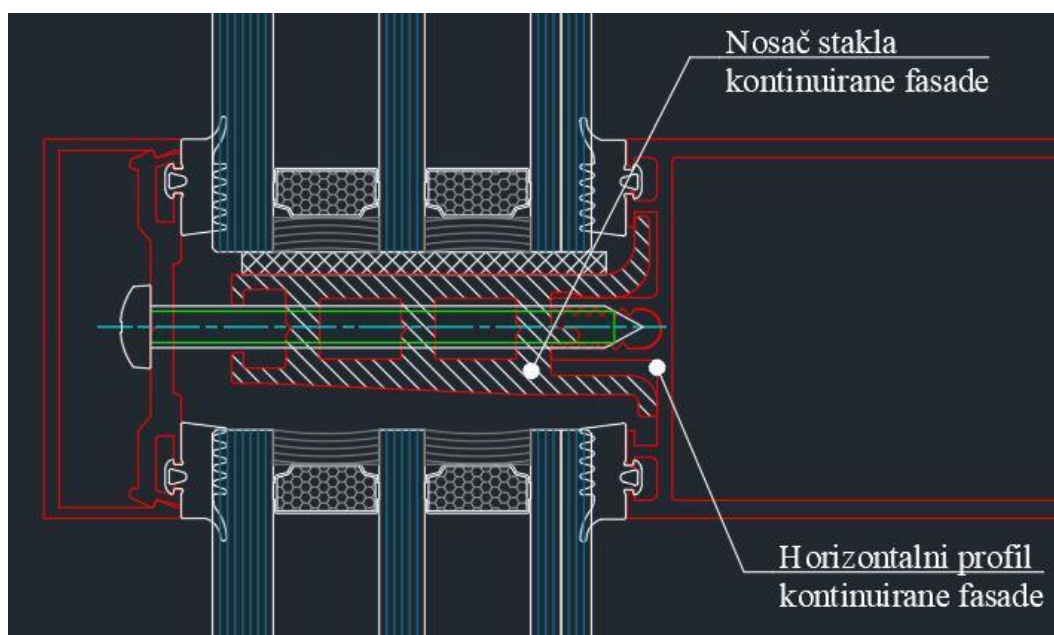
Kod korištenja klizne spojnice, između horizontale i vertikalne, radi omogućavanja prostora za klizanje i dilataciju, stvara se velika zračnost te se vidi dio klizne spojnice. Na slici 55. naznačen je dio pod nazivom Dilatacijska brtva. Na spoju vertikalnog i horizontalnog, oko spojnice izrezuje se gumena brtva koja svojim oblikom sličí presjeku horizontale. Na taj način vertikalna i horizontalna nikad nisu u direktnom kontaktu i izbjegava se opasnost oštećenja uslijed toplinskih deformacija. Kod standardne fiksne spojnice, debljina te brtve iznosi 2 mm, no to nije dosta kod klizne spojnice pa je posebno konstruirana brtva oko klizne spojnice koja zatvara zazor. Model te brtve prikazan i presjek spoja klizne spojnice prikazani su na slici 59.



Slika 59. 3D model brtve klizne spojnice i presjek spoja klizne spojnice

3.3.4. Nosač stakla kontinuirane fasade

Originalna serija kontinuirane fasade nije sadržavala nosač stakla za svoje profile, već su se koristili nosači stakla drugih proizvođača. Nosači stakla od drugih proizvođača i horizontalni profil sustava AK 50 nisu kompatibilni, ali uslijed pričvršćivanja vijcima, obavljali su svoju funkciju dovoljno kvalitetno da nije bilo potrebe razviti vlastiti nosač stakla. U suradnji s poduzećem ALU-KON, u ovom diplomskom radu je razvijen nosač stakla za kontinuiranu fasadu AK 50, a prikazan je na slici 60. u nastavku teksta.

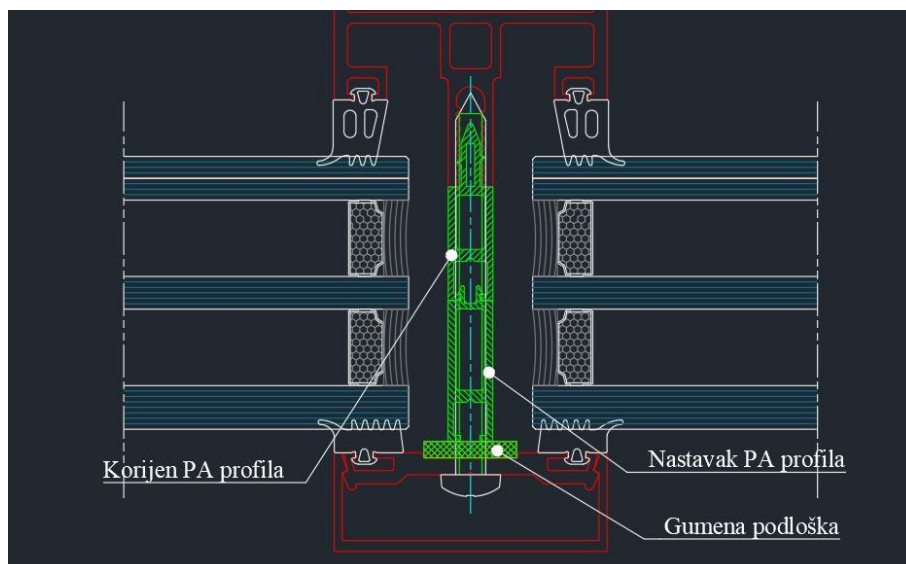


Slika 60. Nosač stakla kontinuirane fasade

Nosač stakla kontinuirane fasade ima dugačku ravnu površinu koja mora pokriti barem dvije trećine paketa stakla kako bi se osiguralo pravilno prenošenje opterećenja stakla i kako nebi došlo do puknuća stakla. Nosač stakla oblikom na više mjesta prenosi opterećenje težine stakla na horizontalni profil kontinuirane fasade sa različitim izdancima koji su oblikovani tako da se prilagode horizontalnom profilu. Prenosnje opterećenja težine se prenosi oblikom s nosača na horizontalni profil, a samoreznim vijcima osigurava se pozicioniranje nosača stakla po duljini horizontalnog profila. Najbolja pozicija za nosač stakla, koji je širine 100 mm je 150 – 200 milimetara od osi simetrije nosača stakla do osi simetrije vertikalnog profila kontinuirane fasade. Potrebno je napomenuti da ovaj novi dizajn nosača stakla kontinuirane fasade omogućava upotrebu troslojnih IZO stakala, što uvelike utječe na toplinsku provodljivost cijelog fasadnog sustava.

3.3.5. Profil prekida toplinskog mosta

Pričvrtni profil vijcima se povezuje za nosive profile kontinuirane aluminijsko-staklene fasade na otprilike svakih 500 mm, ovisno o dimenzijama staklenog polja, a detalj tog spoja prikazan je na slici 51. u prethodnom poglavlju. Pričvrtni profil mora imati neku podlogu kako se ne bi kompletno deformirao uslijed zatezanja vijka. Kao podloga, a i u svrhu smanjenja prolaznosti topline, između nosivog i pričvrtnog profila postavlja se profil od materijala PA 66 koji je izvršni toplinski izolator te je neophodan element u suvremenim kontinuiranim aluminijsko-staklenim fasadama. Na slici 61. prikazan je detalj spoja PA profila između vertikalnog i pričvrtnog profila kontinuirane aluminijsko-staklene fasade.

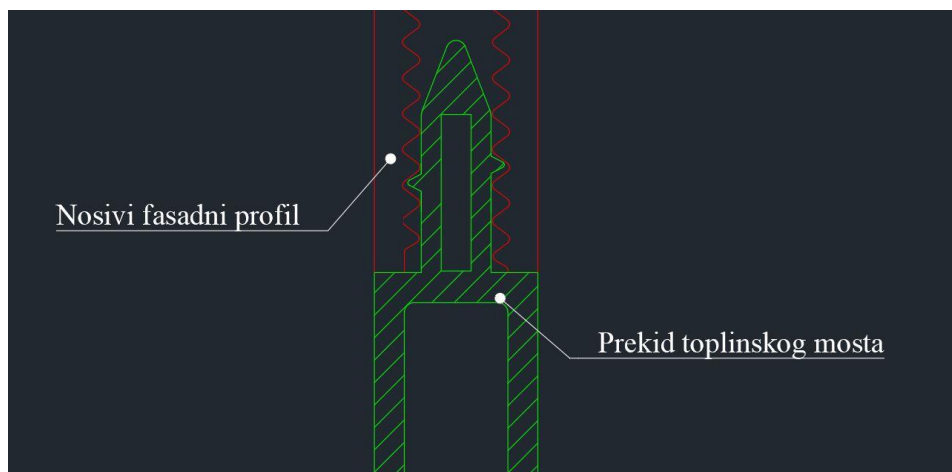


Slika 61. Detalj spoja PA 66 profila

Kako bi se omogućila upotreba različitih dimenzija širine IZO paketa, profil za prekid toplinskog mosta od materijala PA 66 konstruiran je iz dva dijela. Zamišljeno je da je korijen uvijek isti, a da se nastavak ekstrudira ovisno o potrebi. U ovom slučaju korišten je paket IZO stakla ukupne debljine 50 mm i za taj paket se koristi nastavak koji je prikazan na slici 61. iznad ovog odlomka. Spoj nastavka i korijena konstruiran je slično kao spoj pričvrstnog i pokrovnog profila, na „klik“.

Između pričvrstnog profila i profila za toplinsku izolaciju, na mjestu vijka nalazi se gumena podloška debljine 3 mm koja dopušta finu regulaciju zatezanja vijka, da se, u slučaju nepreciznosti u obradi, može kompenzirati do 2 mm pritezanjem vijka.

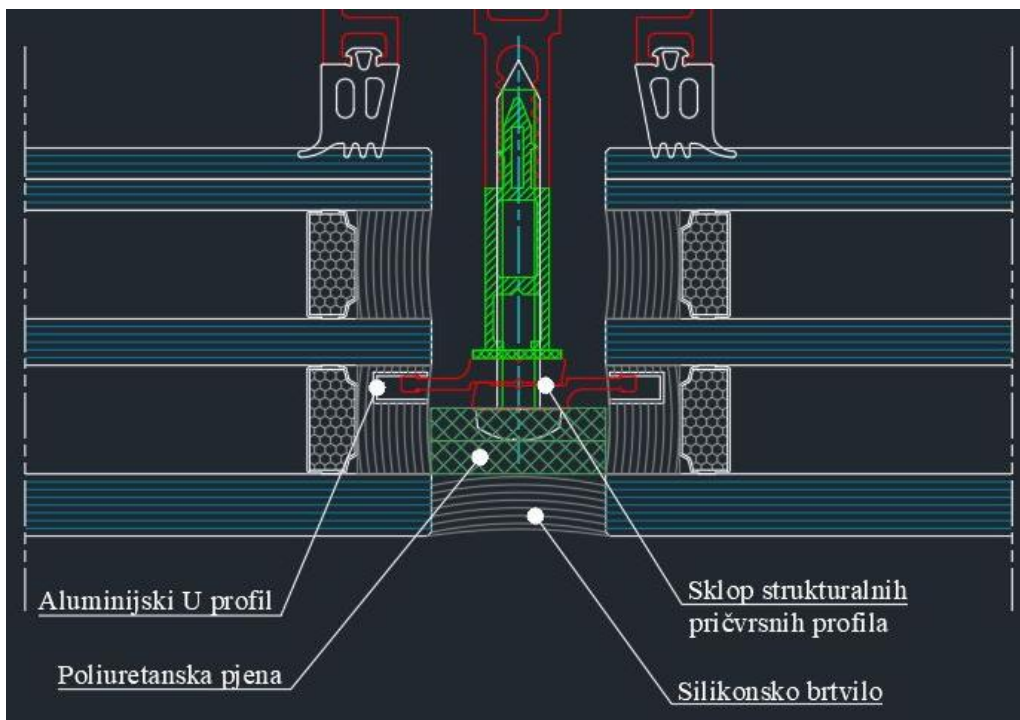
S druge strane, profil za prekid toplinskog mosta ima posebno konstruiran izdanak koji je namijenjen za ulaz u vrh nosivog aluminijskog profila fasade koji u sebi sadrži utore za navoj samoreznog vijka. Na slici 62. vidljiv je detalj tog spoja. Kako bi se izbjeglo odvajanje profila prekida toplinskog mosta od nosivog aluminijskog profila, konstruirana su dva mala izdanka koji se pozicioniraju u utore za navoj. Rezultat toga je da se profil prekida toplinskog mosta ne može sam odvojiti, ali uz primjenu male sile, lagano se deformiraju izdanci i profil termo mosta se izvuče iz nosivog fasadnog profila ukoliko je to potrebno.



Slika 62. Detalj spoja profila za prekid toplinskog mosta i nosivog profila fasade

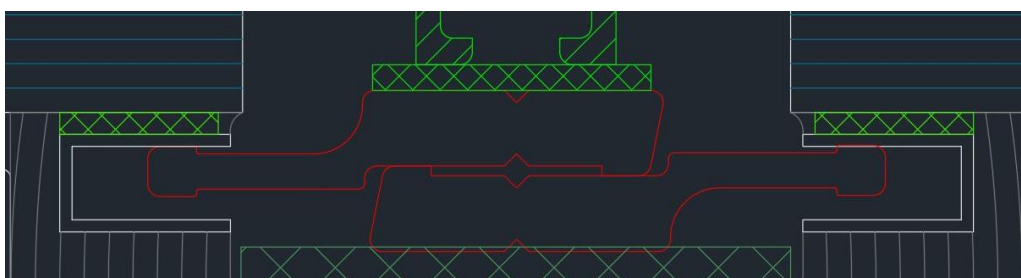
3.4. Strukturalna kontinuirana fasada AK 50S

Kao što je već spomenuto u ovom radu, strukturalna fasada komercijalni je naziv za staklenu fasadu koja s vanjske strane ima vidljivo samo staklo. Fuge između staklenih polja zatvaraju se najčešće silikonskim brtvilom. U sklopu ovog diplomskog rada razvijena je aluminijsko-staklena strukturalna kontinuirana fasada pod nazivom AK 50S. Strukturalna kontinuirana fasada AK 50S koristi iste nosive profile i brtve kao i kontinuirana fasada AK 50, ali je razlika u načinu pričvršćivanja stakla za nosivi profil. Kod obične kontinuirane fasade s vanjske strane nalaze se aluminijski profili koji pritišću stalo na nosive profile, dok kod strukturalne kontinuirane fasade, spoj vijaka i pričvršnih profila mora biti skriven u fugi između stakala. Na slici 63. prikazan je detalj pričvršćivanja stakla na strukturalnoj kontinuiranoj aluminijsko-staklenoj fasadi AK 50S.



Slika 63. Karakterističan detalj strukturalne fasade AK 50S

Kao što je već spomenuto, sustav AK 50S koristi iste nosive aluminijske profile, gumene brtve za naslon stakla i korijen profila za prekid toplinskog mosta. Dalje od toga, sustav se značajno razlikuje od obično sustava AK 50. Specifičnost sustava AK 50S je sklop strukturalnih pričvršnih profila koji je sakriven u fugi između stakala. Na slici 64. prikazan je detalj sklopa strukturalnih pričvršnih profila. Strukturalni pričvršni profili konstruirani su tako da se mogu univerzalno koristiti i za lijevo staklo i desno, ali i samo za jedno staklo, ako je npr. kraj fasade na toj strani.

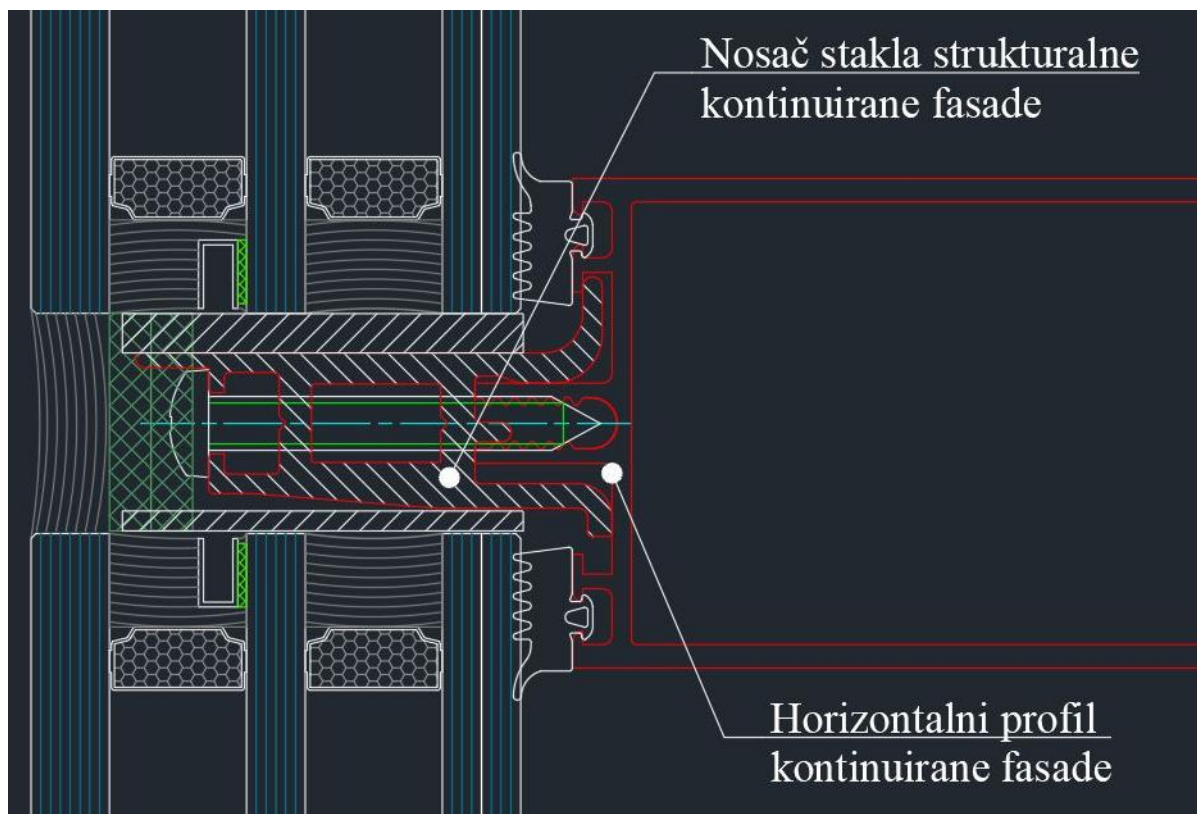


Slika 64. Detalj strukturalnog pričvršnog profila

Kako bi se omogućilo korištenje skrivenog sustava pričvrstnih profila, potrebno je izraditi posebno strukturalno IZO staklo. Za izradu strukturalnog IZO stakla potrebno je koristiti drugačije sekundarno izolacijsko ljepilo između dva stakla u IZO paketu. U prostoru ljepila između vanjskog i središnjeg stakla kod troslojnog IZO stakla, a kod dvoslojnog IZO stakla između vanjskog i unutarnjeg, umeće se aluminijski U profil na točno određenu poziciju. Taj U profil može se ugraditi kontinuirano oko cijelog stakla ili na svakih 500 mm u duljini od 100 mm, a pričvrstni profili su uvijek duljine 100 mm. Taj aluminijski U profil u strukturalnom IZO staklu služi kao utor u koji se ubacuje strukturalni pričvrstni profil i na taj se način pričvršćuje staklo u strukturalnoj fasadi. S obzirom da vanjsko staklo nije direktno mehanički pričvršćeno i osigurano, pri izradi IZO stakla koristi se posebno strukturalno ljepilo za staklo koje ima sposobnost izdržati veća opterećenja od ljepila za obično IZO staklo.

Kad se strukturalni pričvrstni profili vijcima pričvrste za nosive aluminijske profile i osiguraju staklo, potrebno je ispuniti prostor od profila za prekid toplinskog mosta do vanjskog stakla s poliuretanskom pjenom pravokutnog presjeka. Ova PU pjena istovremeno služi kao dodatni izolator, ali i naslon za silikonsko brtvilo kojim se na kraju ispunjavaju fuge između stakala.

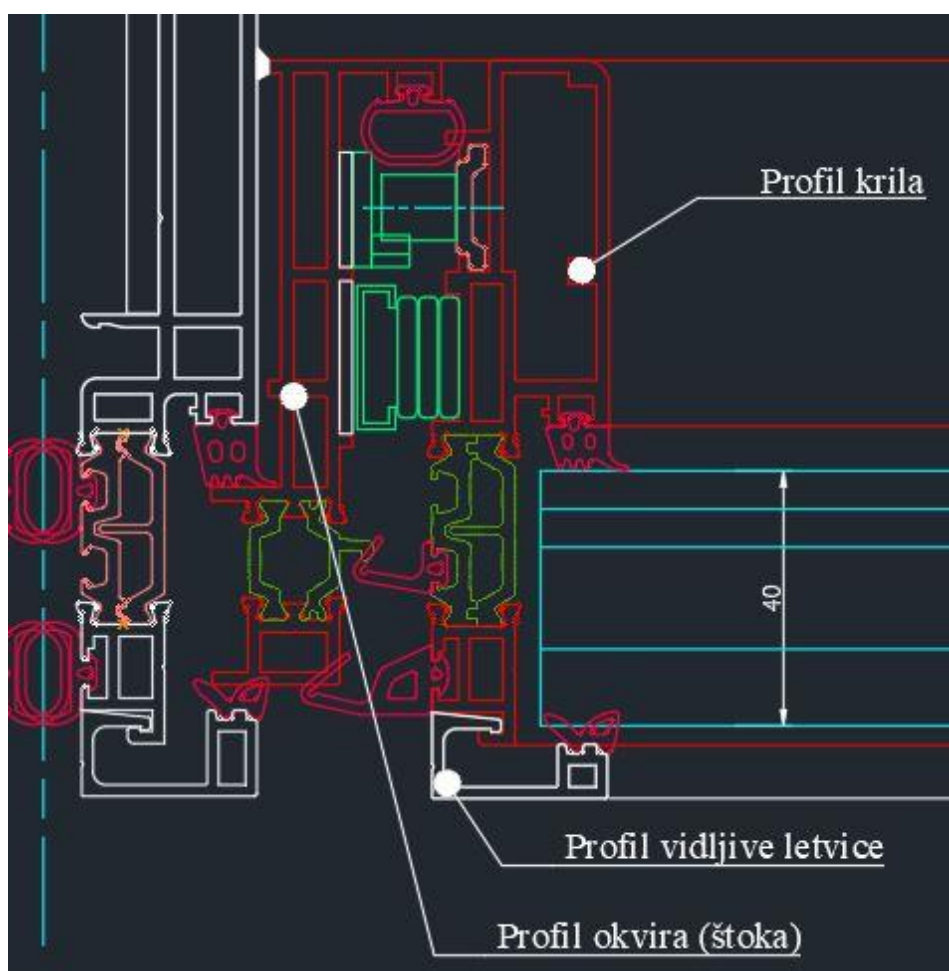
Radi smanjenja prostora uzrokovanog ispunjenjem fuge između stakala strukturalnim ljepilom i PU pjenom, potrebno je skratiti nosač stakla. Na slici 63. prikazan je modificiran nosač stakla za strukturalnu fasadu AK 50S. U usporedbi s nosačem stakla za kontinuiranu fasadu, koji je vidljiv na slici 60. u prethodnom poglavlju, nosač stakla za strukturalnu fasadu, skraćen je ukupno 15 mm, ali je s gornje strane produžen za 5 mm kako bi mogao primiti deblje pakete stakla. Princip prenošenja opterećenja isti je kao kod kontinuirane fasade, sva težina stakla prenosi se oblikom na nosivi aluminijski profil, a vijcima se osigurava pozicija duž osi nosivog horizontalnog profila kontinuirane fasade.



Slika 65. Nosač stakla strukturalne kontinuirane fasade

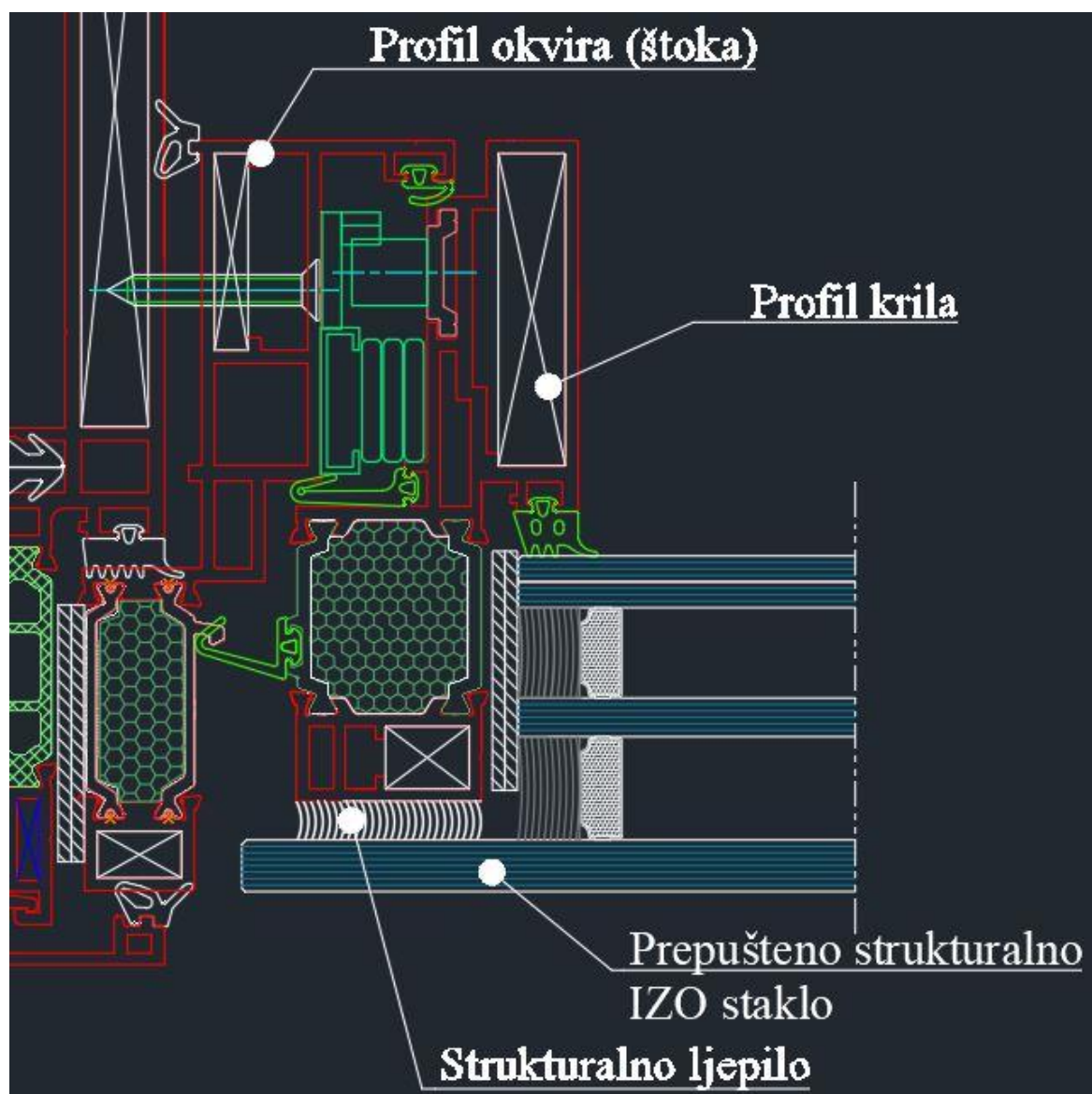
3.5. Otklopni prozor u fasadi AK 100

Aluminijsko staklene fasade, uz funkcije vodonepropusnosti, zrakonepropusnosti i estetike mogu imati i funkciju ventilacije zraka unutar zgrade, što se ostvaruje pomoću pomičnih polja, najčešće u obliku prozora. Prozori mogu biti, otklopni prema unutra (ventus), otklopni prema van, zaokretni, otklopno-zaokretni, klizni i na izbačaj. Na velikim i visokim zgradama, nije poželjno imati prozor koji ima preveliki otvor, kako bi se izbjegla mogućnost pada kroz prozor. Također, nepoželjno je koristiti tip prozora s otvaranjem prema unutra radi maksimalnog iskorištavanja površine interijera. Presjek ovih zahtjeva jesu otklopni prozor prema van i prozor na izbačaj. Poduzeće ALU-KON u sklopu originalne element fasade AK E65 ima razvijen sustav profila za otklopni prozor prema van. Sustav je bez oznake jer je specifično razvijen za element fasadu AK E65. Na slici 66. prikazan je karakteristični presjek otklopnog prozora prema van originalne element fasade AK E65.



Slika 66. Karakteristični presjek postojećeg sustava otklopnog prozora u fasadi

Prozor je razvijen specifično za projekte Green Gold i DoubleTree by Hilton te je projektni zahtjev bila vidljiva letvica s vanjske strane prozora. Suvremeni trend strukturalnog prozora u fasadi, bez letvice, izrazito je jači od trenda prozora s letvicom oko stakla te je odlučeno da će se postojeći sustav podosta izmijeniti i prekonstruirati u strukturalni prozor. Dakle, karakteristika takvog prozora, kao i svakog sustava s opisom „strukturalni“, je da je s vanjske strane vidljivo samo staklo. Na slici 67. prikazan je karakteristični presjek novog sustava strukturalnog otklopnog prozora u fasadi pod oznakom AK 100.



Slika 67. Strukturalni otklopni prozor u fasadi AK 100

Sustav profila za otklopni prozor u fasadi AK 100 prilagođen je za sve sustave fasada koji su razvijeni u sklopu ovog diplomskog i to se može vidjeti u priloženoj tehničkoj dokumentaciji.

Najbitnija karakteristika ovog prozora je vrlo velika širina površine lijepljenja strukturalnog stakla na aluminijski profil krila. Širina lijepljenog spoja iznosi 30 mm. U nastavku slijedi izvod dozvoljenog područja primjene strukturalnog prozora AK 100. Kao što je u ovom radu već objašnjeno, izraz za minimalnu potrebna širina lijepljenog spoja kod prepuštenog strukturalnog stakla glasi:

$$x = \frac{L \cdot W \cdot S}{2 \cdot 140}, \quad (3.1)$$

gdje su:

$x = 30 \text{ mm}$ – Širina površine strukturalnog lijepljenja,
 L – Kraća dimenzija stakla koje se lijepi [mm],
 W – Opterećenje vjetra [kPa],

$S = 1,5$ – Faktor sigurnosti.

Iz ovih vrijednosti slijedi:

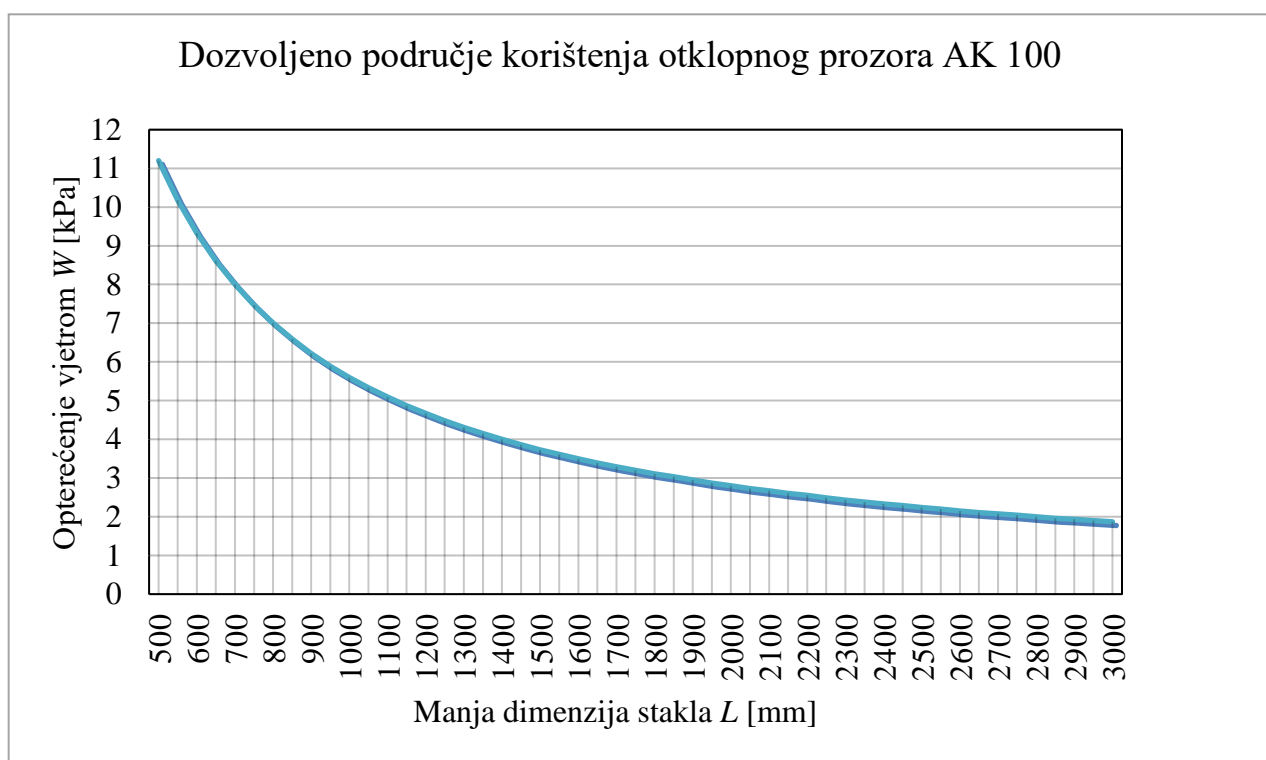
$$L \cdot W = \frac{x \cdot 2 \cdot 140}{S} = \frac{30 \cdot 2 \cdot 140}{1,5} \quad (3.4)$$

$$L \cdot W = 5600.$$

Kada se preformulira jednačba 3.3, dobije se hiperbola sljedeće jednačbe:

$$W = \frac{5600}{L}. \quad (3.5)$$

Na slici 68. prikazan je graf jednačbe hiperbole (3.5).



Slika 68. Dozvoljeno područje primjene otklopnog prozora AK 100

Dakle, dozvoljeno područje primjene strukturalnog prozora AK 100 nalazi se ispod krivulje grafa na slici 68. i vidljivo je da iznosi izrazito puno. Na 3000 mm manje širine stakla, otklopni prozor AK 100 može se primjenjivati u zonama s vjetrovnim opterećenjem od 2,0 kPa, što je izrazito veliko opterećenje vjetrom koje se može naći na vrlo malo mjesta.

Ono što bitno razlikuje sustav AK 100 od ostalih sustava spomenutih i razrađenih u ovom diplomskom radu jest pomično krilo u odnosu na okvir, odnosno funkcija otvaranja. Funkciju otvaranja omogućuje sustav okova specificiran za otklopne prozore u fasadi. Za sustav otklopnog prozora u fasadi AK 100 odabran je sustav okova Talijanskog proizvođača Giesse, baziran oko škara oznake GS HD type P nosivosti do 155 kg. Shema sustava prikazana je na slici 69. u nastavku.

Top-Hung arms +

GS HD type P (10 products)	For sashes from 50 to 180 kg
GS HD type M (8 products)	For sashes from 12 to 35 kg
GS HD type A (8 products)	For sashes from 16 to 32 kg
GS HD Euro Groove (4 products)	For sashes from 50 to 100 kg
GS HD type TS (4 products)	For sashes from 50 to 100 kg

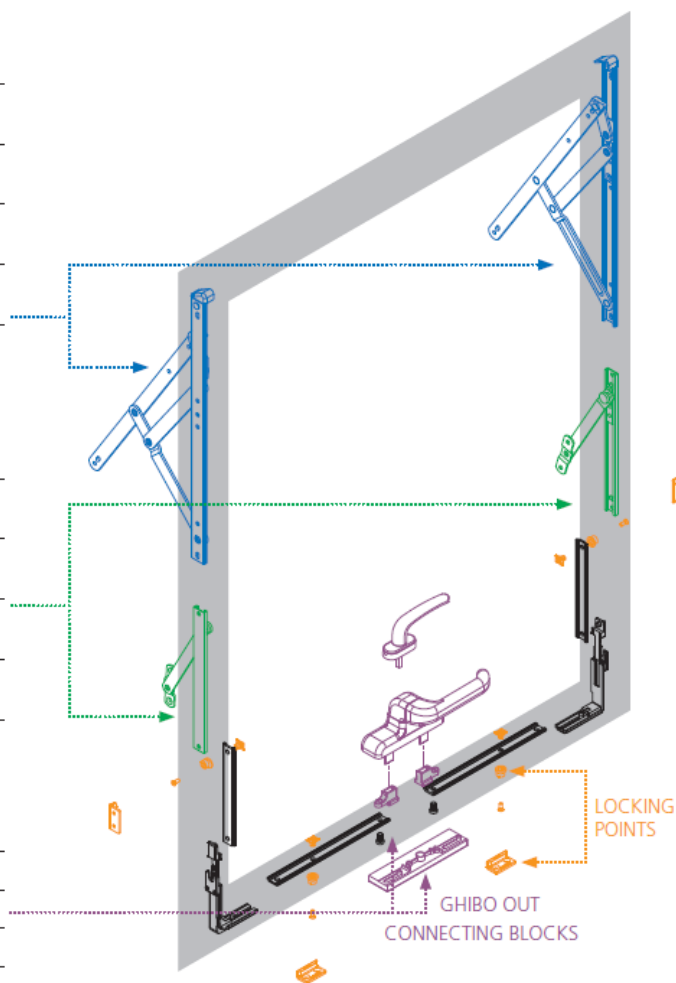
Limitation arms +

Limitation arms type L	Can be combined with GS HD arms type P and A
Limitation arms type LASER (*)	Can be combined with GS HD arms type P and A
Limitation arms type I	Can be combined with GS HD arms type P and A
Limitation arms type N	Can be combined with GS HD arms type M
Limitation arms type FRIZ	Can be combined with GS HD arms type P and A

Mechanisms +

Cremona Euro CW2	Two way	+ blocks
Cremona Unica CW2	Two way	+ blocks
Cremona Euro CW1	One way	Connection
Window handle Prima	One way	+ Ghibo

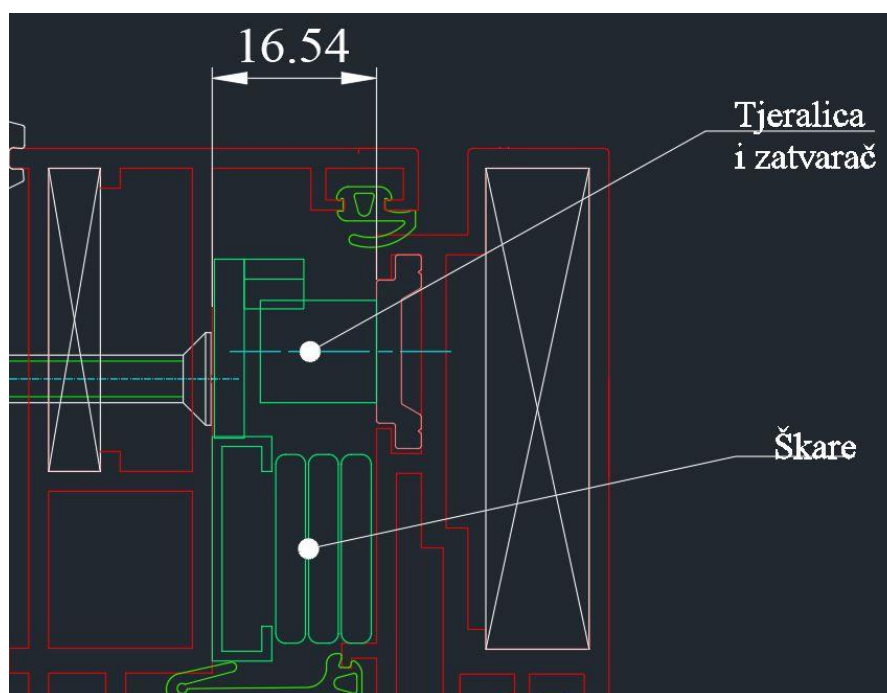
(*) certain products only



Slika 69. Shema sustava okova za otvaranje prema van proizvođača Giesse

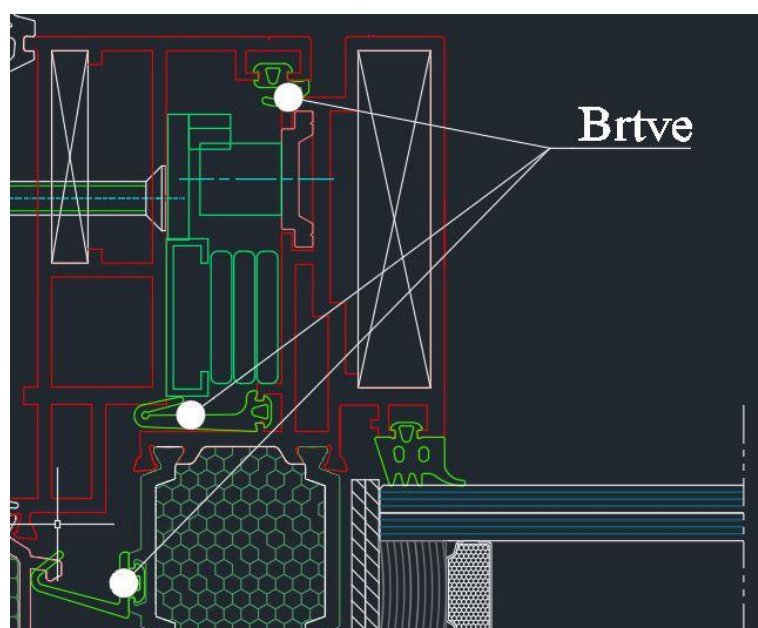
Sustav se sastoji od dvaju škara za otvaranje (na slici 69. označene plavom bojom), koje su odgovorne za gibanje prozorskog krila prema van. Nadalje, u sustavu se nalaze sigurnosne škarice (na slici označene zelenom bojom) čija je svrha limitacija kuta otvaranja prozora prema van. Crnom bojom označeni su kutnici i tjeralice, kutnici su posebni prijenosnici gibanja koji zakreću translacijsko gibanje iz jedne ravnine u ravninu okomitu na nju, a tjeralice su plastični profili koji vrše translacijsko gibanje. Narančastom bojom označeni su zatvarači, mali okrugli elementi oko kojih su, kada je prozor zatvoren, čvrsto obavijene tjeralice. Uslijed zakretanja ručke, mehanizam unutar ručke pokrene horizontalne tjeralice koje se tako odmaknu od svojih zatvarača. Horizontalne tjeralice spojene su s kutnikom koji njihovo gibanje prenese na vertikalne tjeralice, time ih odvajajući od njihovih zatvarača i zatim se prozor može otvoriti onoliko koliko mu dozvoljavaju sigurnosne škarice.

Kako bi cijeli taj sustav funkcionirao, potrebno je na profilima okvira i krila imati precizne utore i dovoljne udaljenosti između profila kako bi svi elementi sustava okova za otklopne prozore stali na svoja mjesta i funkcionirali kako treba. Prema tim zahtjevima konstruirani su posebni dijelovi. U prilogu ovom diplomskom radu nalazi se stranica iz kataloga proizvođača sustava okova Giesse na kojoj se vidi da minimalna širina potrebna između profila krila i okvira mora iznositi 16,5 mm. Na slici 70. nalazi se detalj između krila i okvira sustava profila AK 100 na kojoj se vidi da je zadovoljena minimalna udaljenost od 16,5 mm te su naznačene pozicije određenih elemenata sustava okova.



Slika 70. Detalj okova u sustavu profila AK 100

Konačno, jedni od najbitnijih zahtjeva za aluminijsko-staklene fasade, a s time i prozore, jesu zrakonepropusnost i vodonepropusnost. Postoje određene kategorije zrakonepropusnosti i vodonepropusnosti koje se specifično zahtijevaju ovisno o projektu. Jedini način za određivanje u koju kategoriju spada sustav AK 100 jest ispitivanjem i certificiranjem. Konstrukcijski, zrakonepropusnost i vodonepropusnost reguliraju se gumenim brtvama između profila. Opće pravilo pri konstruiraju aluminijskih prozora, bilo otklopnih ili zaokretnih, je da moraju postojati tri gumene brtve između okvira i krila kako bi se osigurala dovoljna vodonepropusnost i zrakonepropusnost da se prozorski sustav može eksploatirati. Na slici 71. detaljno su prikazane tri brtve po presjeku sustava profila za otklopni prozor u fasadi AK 100.

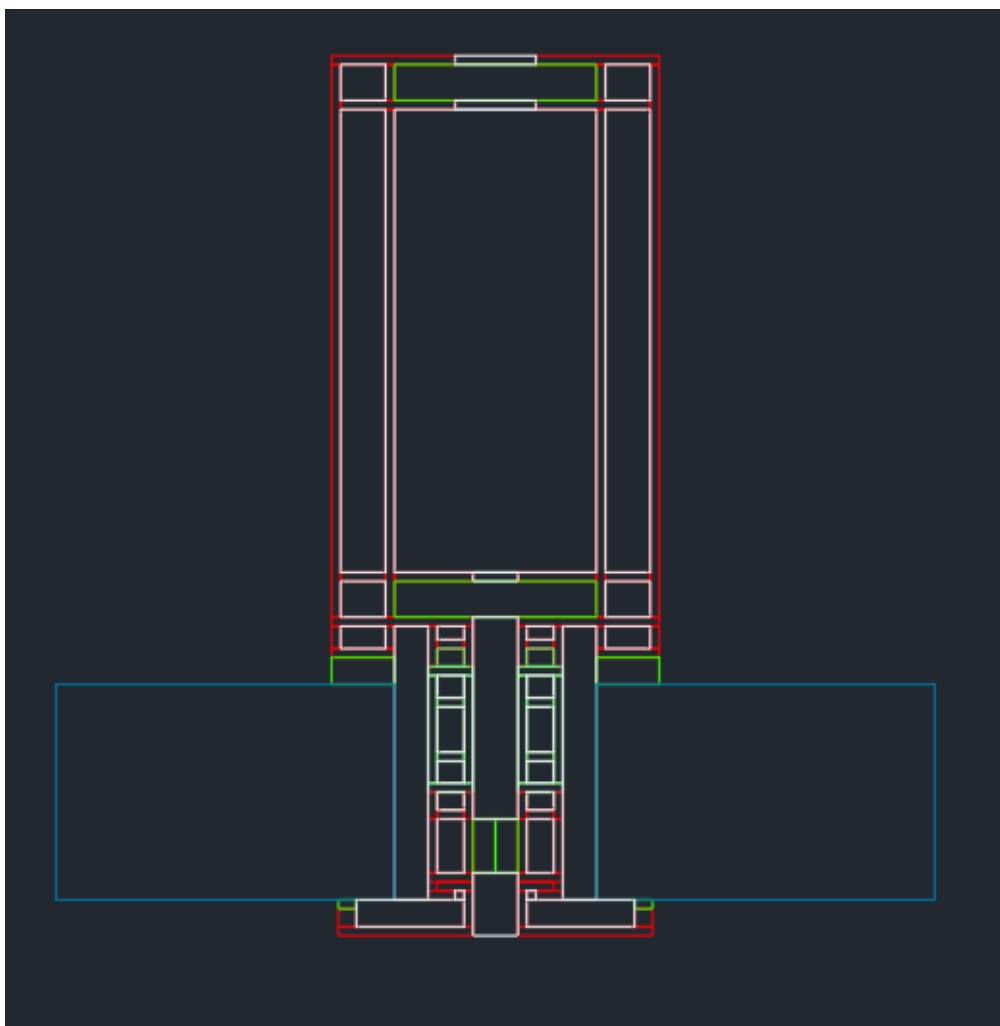


Slika 71. Brtve sustava AK 100

4. ANALIZA TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI

U sklopu ovog diplomskog rada, izrađena je analiza toplinske provodljivosti novo-razvijenih sustava u softverskom paketu CRORAL koji je razvijen na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Izrađene su analize toplinske provodljivosti sustava element fasade AK E65 i sustava kontinuirane fasade AK 50 te je određen faktor prolaznosti topline U_w . Softverski dobiveni rezultati koeficijenta prolaznosti topline U_w uspoređeni su s koeficijentima prolaznosti topline postojećih sustava koji su dobiveni laboratorijskim ispitivanjem od strane Laboratorija za građevinsku fiziku instituta IGH.

Softver za analizu toplinske provodljivosti CRORAL, radi prema normi EN 10077:2017 koja opisuje numeričku metodu određivanja toplinske provodljivosti prozorskih i fasadnih sustava. Princip je da se presjek sustava pojednostavi i prikaže pomoću običnih pravokutnika. Na slici 72. prikazan je princip pripreme presjeka za CRORAL u programskom paketu AutoCAD. Potrebno je svaki pravokutnik staviti u posebno određen layer, ovisno o tome koji je materijal prikazan tim pravokutnikom. Na slici vidimo crvenom bojom označene pravokutnike koji simboliziraju aluminijske profile, tamnozelenom bojom gumene brtve, plavom bojom staklo, svijetlozelenom bojom izolator od PA 66 i bijelom bojom zrak. Neophodno je da su sve stranice svih pravokutnika sasvim spojene, ne smije ostati nedefiniranog prostora između pravokutnika.



Slika 72. Priprema presjeka za CRORAL

Nakon izvršene pripreme presjeka profila, potrebno je definirati ulazne parametre, odnosno linijske koeficijente toplinske provodljivosti materijala koji se koriste u fasadnom sustavu.

Tablica 3. Koeficijenti toplinske provodljivosti

Br.	Materijal	λ [W/m K]
1	Aluminijska legura AW 6060 T66	200
2	Poliamid PA 66	0,25
3	Troslojno IZO staklo 8ESG+14Ar+6 Float+14Ar+44.2 LowE 1.0	0,045
4	Guma EPDM	0,20
5	Zrak	0,03

Troslojno IZO staklo koje se sastoji od vanjskog kaljenog stakla debljine 8 mm, međuprostora debljine 14 mm ispunjenog argonom, srednjeg običnog stakla debljine 6 mm, još jednog međuprostora debljine 14 mm i dva laminirana stakla, svako debljine 4 mm s mekim metalnim premazom LowE 1.0, u ovom se diplomskom radu koristilo kao standardno. Iako je ono kompozitni materijal, za njega je određen koeficijent toplinske provodljivosti prema normi HRN EN ISO 6946 pomoću sveukupnog koeficijenta toplinske provodljivosti stakla U_g i debljine paketa d na sljedeći način:

$$\lambda = U_g \cdot d. \quad (4.1)$$

Prema izvještaju od proizvođača stakala AGC danom u prilogu, površinski koeficijent prolaznosti topline za ovaj paket IZO stakla iznosi $U_g = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$, a debljina paketa iznosi $d = 50 \text{ mm}$, stoga koeficijent toplinske provodljivosti za ovaj tip IZO stakla otprilike iznosi:

$$\begin{aligned} \lambda &= U_g \cdot d = 0,9 \cdot 0,05 \\ \lambda &= 0,045 \text{ W/m}^2\text{K}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Nakon definiranja ulaznih parametara, potrebno je stvoriti rubne uvjete, odnosno temperature interijera i eksterijera. Prema normi EN 10077-2:2017 rubni uvjeti glase:

Tablica 4. Rubni uvjeti prema normi EN 10077:2017

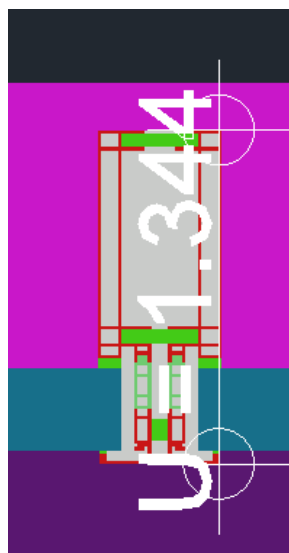
Fizikalna veličina	Interijer	Eksterijer
Temperatura [°C]	20	0
Vlažnost zraka [%]	60	90
Plošni koeficijent prijelaza topline po normi HRN EN ISO 6946 [W/m ² K]	7,69	25

Nakon pravilnog definiranja presjeka profila, uvrštavanja početnih parametara i definiranja rubnih uvjeta moguće je pokrenuti analizu.

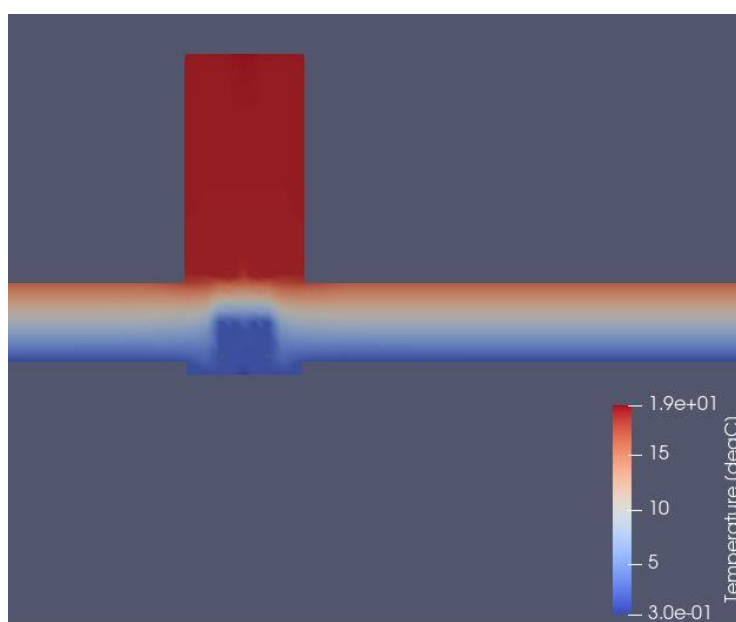
4.1. Element fasada AK E65

Prema izvještaju o ispitivanju toplinske provodljivosti element fasade AK E65 od Laboratorija za građevinsku fiziku instituta IGH iz 2011. godine, navedeni sustav u kombinaciji s dvoslojnim IZO staklom ima sveukupni koeficijent prolaznosti topline U_w u iznosu od $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Suvremeni trendovi i standardi visokogradnje zahtijevaju koeficijent toplinske provodljivosti između $1,4$ i $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dakle, kao dokaz toplinski ispravno preoblikovanog fasadnog sustava AK E65, novi koeficijent prolaznosti topline mora barem iznositi manje od $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Na slici 73. vidljiv je sveukupan koeficijent toplinske prolaznosti kroz presjek profila i iznosi $U_w = 1,344 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ovaj koeficijent prolaznosti topline izrazito je dobar i omogućava primjenu novorazvijene element fasade AK E65 u svim područjima novogradnje. Na slici 74. vidljiv je temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK E65. Važno je uzeti u obzir rubne uvjete temperature interijera i eksterijera.



Slika 73. Koeficijent toplinske provodljivosti AK E65

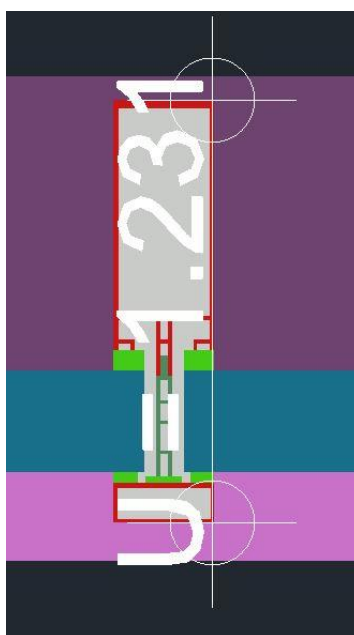


Slika 74. Temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK E65

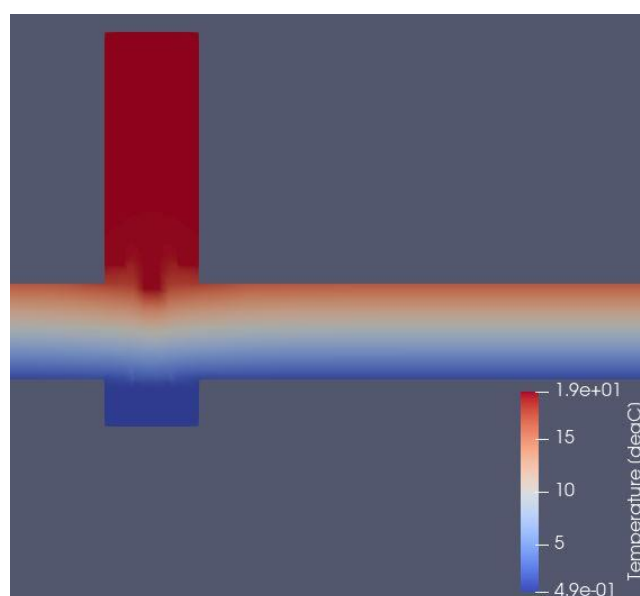
4.2. Kontinuirana fasada AK 50

Analogno element fasadi AK E65, izvršeno je i ispitivanje toplinske provodljivosti fasadnog sustava AK 50. Ispitivanje je izvršeno 2012. godine u Laboratoriju za građevinsku fiziku instituta IGH u Zagrebu. S dvoslojnim IZO staklom sustav profila AK 50 imao je vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti $U_w = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dakle, sustav AK 50 zadovoljava i suvremene zahtjeve toplinske izolacije.

U ovom diplomskom radu sustavu AK 50 poboljšana su izolacijska svojstva i omogućeno je korištenje troslojnog IZO stakla. Prema analizi u softveru CRORAL, Koeficijent toplinske provodljivosti sustava AK 50 s troslojnim IZO staklom iznosi $U_w = 1,231 \text{ W/m}^2\text{K}$, kao što je vidljivo na slici 75, a na slici 76. vidljiv je temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK 50.



Slika 75. Koeficijent toplinske provodljivosti AK 50



Slika 76. Temperaturni gradijent kroz presjek fasade AK 50

4.3. Zaključak analize koeficijenta toplinske provodljivosti

Nakon provedene numeričke analize prema normi EN 10077:2017 i dobivenih koeficijenata toplinske provodljivosti ustanovljeno je da je preoblikovanje postojećih sustava fasada AK E65 i AK 50 krenulo u dobrom smjeru s pogleda toplinske provodljivosti. Novorazvijene fasade imaju bolja izolacijska svojstva od postojećih sustava, odnosno analitički postižu niže koeficijente toplinske provodljivosti.

Određivanje koeficijenata toplinske provodljivosti strukturalne element fasade AK E65S i strukturalne kontinuirane fasade AK 50S bit će predmet budućih istraživanja.

Iako je norma EN 10077:2017 vrlo precizna kod izračuna koeficijenata toplinske provodljivosti kod prozorskih i fasadnih sustava, nakon izrade uzorka novorazvijenih fasada neophodno je izraditi propisno ispitivanje i eksperimentalno odrediti prave koeficijente toplinske provodljivosti fasadnih sustava koji su razvijeni u ovom diplomskom radu.

5. ANALIZA NAPREZANJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

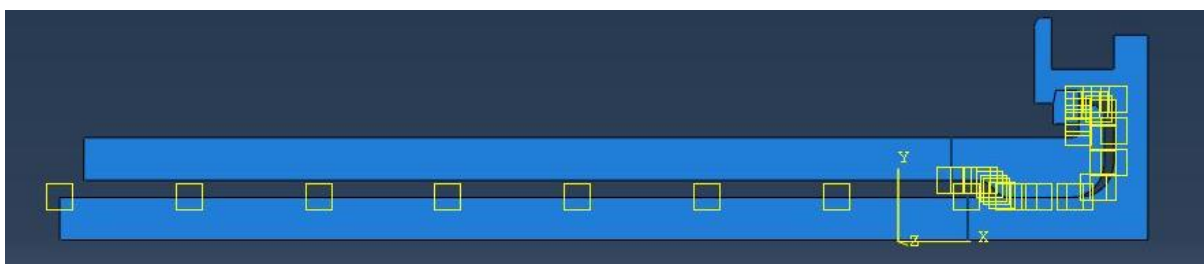
U sklopu ovog diplomskog rada izrađena je analiza naprezanja metodom konačnih elemenata nosača stakla element fasade AK E65, odnosno AK E65S. Nosač stakla bio je očit kandidat za analizu naprezanja metodom konačnih elemenata radi toga što je relativno malen i tanak poprečni presjek tog elementa, a nosi relativno velika opterećenja težine stakla. Na slici 40. prikazan je detaljan presjek navedenog nosača stakla. Nosač stakla svojim se donjim dijelom osloni na nosivi aluminijski profil, a drugim dijelom zakači s gornje strane. Ostatak profila služi za naslon stakla.

S obzirom na dosta komplicirane presjeke tankostijenih profila, pojednostavnit će se presjek kako bi se mogla lakše provesti analiza. Na slici 77. vidljiv je pojednostavljeni model koji će se analizirati. Modeliran je nosač stakla u svom pravo obliku, a sklop profila koja se nalazi ispod nosača stakla, a sastoji se od nosivog aluminijskog profila, profila od PA 66 i vanjskog aluminijskog profila, modelirat će se kao jedna površina. Materijal profila je aluminijska legura AW 6060 T66, čiji modul elastičnosti iznosi $E=70000$ MPa, a Poissonov faktor $\nu=0,33$.



Slika 77. Pojednostavljeni model

U svrhu preciznog određivanja naprezanja bilo je potrebno modelirati kontakt između nosača stakla i nosivog aluminijskog fasadnog profila. Najprije treba definirati tip kontakta, u ovom slučaju postoji normalna i tangencijalna sila između površina. Normalna je definirana samo opterećenjem, tangencijalna komponenta faktorom trenja. Iako su oba profila od aluminijske legure, nosivi fasadni profil nedvojbeno je površinski zaštićen procesom plastifikacije, a taj kontakt definira faktor trenja. U ovom slučaju, koeficijent trenja iznosi $\mu = 0,4$. Pri izradi samih kontakata, odabrana je opcija *Finite sliding*, pri kojoj ABAQUS stalno provjerava koji čvor na *master* površini je u kontaktu s kojim čvorom na *slave* površini. Master površina je ona koja ima grublju mrežu, a slave ona koja ima finiju, odnosno gušću mrežu konačnih elemenata. U ovom slučaju slave su sve kontaktne površine koje se nalaze a nosaču stakla. *Finite sliding* je izrazito kompleksna kalkulacija, ali radi veoma kompleksne geometrije modela koja dopušta gibanja i rotacije, neophodna. Na slici 78. prikazane su interakcije između površina.



Slika 78. Interaction

Pri određivanju opterećenja, pretpostavljeno je da je površina sklopa profila na koji se oslanja nosač stakla fiksna te je to modelirano kao uklještenje. Ovu pretpostavku bi u budućim analizama trebalo izbaciti i modelirati pravu situaciju, ali u svrhu analize naprezanja u nosaču stakla, dostatno je uklještenje.

Za ovu analizu, uzeto je da jedan par nosača nosi 3 metara kvadratnih troslojnog stakla oznake 8ESG+14Ar+6Float+14Ar+44.2LowE. Taj paket troslojnog IZO stakla ima ukupno 22 mm dubine stakla te se njegova masa računa na sljedeći način:

$$m = \rho_{st} \cdot A_{st} \cdot d, \quad (5.1)$$

gdje su:

$$\rho_{st} = 2500 \text{ kg/m}^3 - \text{gustoća stakla,}$$

$$A_{st} = 3 \text{ m}^2 - \text{površina stakla}$$

$$d = 8+6+4+4 = 22 \text{ mm} = 0,022 \text{ m} - \text{ukupna debljina stakla.}$$

Iz navedenih podataka slijedi masa troslojnog stakla:

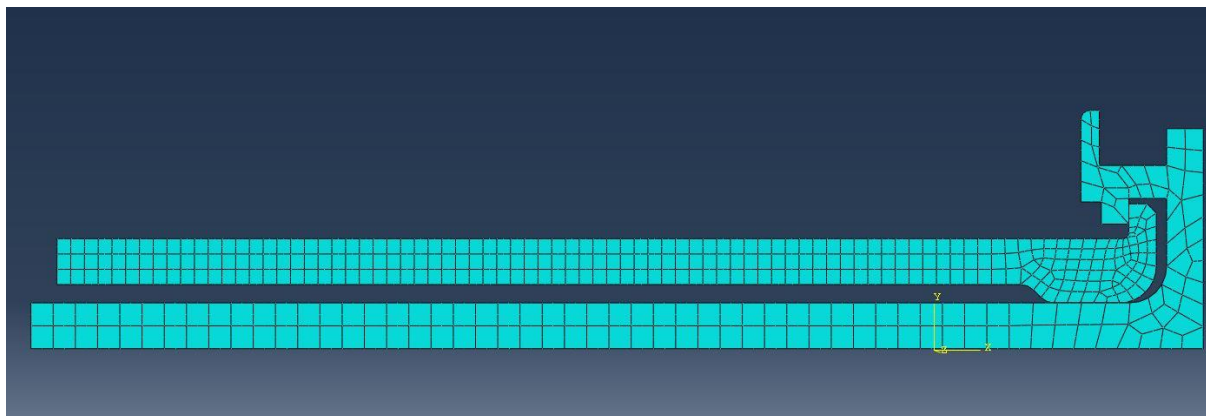
$$\begin{aligned} m &= 2500 \cdot 3 \cdot 0,022 \\ m &= 165 \text{ kg.} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Masa troslojnog stakla u jednom polju iznosi 165 kg i prenosi se na nosivu aluminijsku konstrukciju preko dva nosača stakla svaki površine $A_{nos} = 5000 \text{ mm}^2$ iz čega slijedi iznos opterećenja na jedan nosač:

$$\begin{aligned} p &= \frac{m \cdot g}{2 \cdot A_{nos}} = \frac{165 \cdot 9,81}{2 \cdot 5000} \\ p &= 0,165 \text{ N/mm}^2. \end{aligned} \quad (5.3)$$

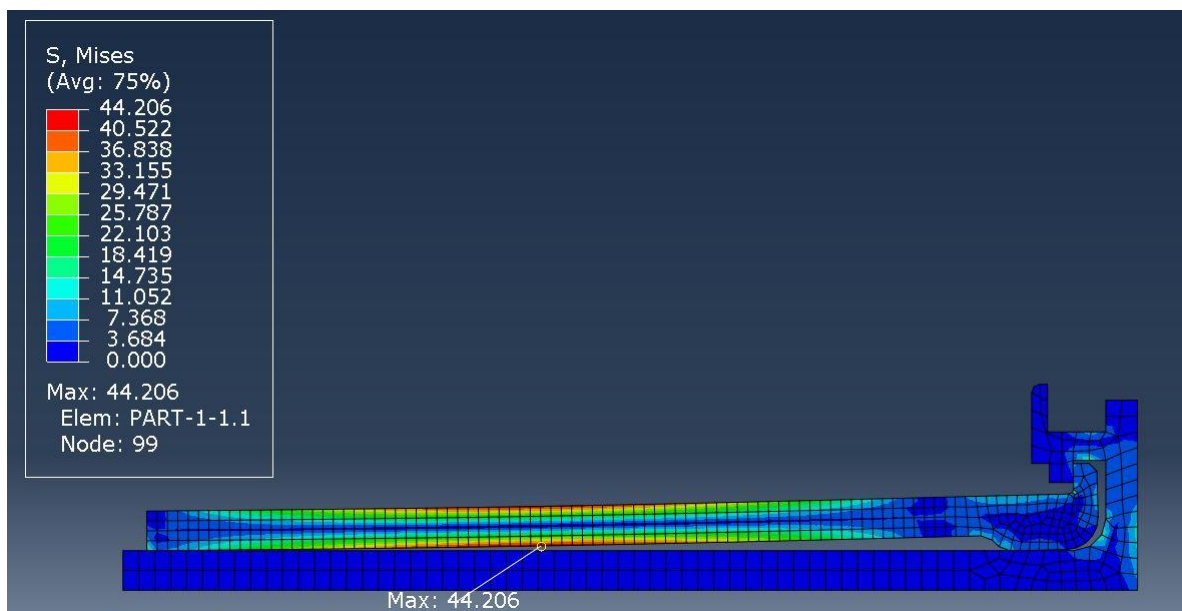
Ovo opterećenje modelirano je kao kontinuirano ravnomjerno opterećenje po cijeloj površini nosača stakla. S obzirom na težinu i nepreciznosti pri proizvodnji IZO stakla, moguće je da je jedno staklo zamaknuto od ostalih stakala u paketu za nekoliko milimetara te ono prenosi svo opterećenje stakla na nosač. Ovaj slučaj je izrazito opasan i vrlo često dolazi do pucanja velikih staklenih ploča jer je laminirano staklo paketa loše izvedeno te strši. Laminirano staklo sastoji se od dvije sljubljene ploče stakla koje su spojene PVB folijom. Ovo staklo je sigurnosno staklo i koristi se često radi svog velikog otpora pucanju i rasipanju uslijed udara po velikoj plohi. Međutim, laminirana stakla često se obrađuju na drugim strojevima od ostalih stakala u IZO paketu te znaju doći većih dimenzija ili čak i nejednakih dimenzija jedno u odnosu na drugo u laminiranom staklu. U svrhu ove analize dostatna je pretpostavka da staklo ravnomjerno raspoređuje težinu, no u budućim analizama trebala bi se odbaciti ta pretpostavka i analizirati prenošenje težine stakla svakog zasebno ili najgori slučaj, samo preko jednog.

Nakon definiranja parametara, bilo je potrebno izraditi mrežu konačnih elemenata i ispitati konvergenciju. Radi kombinacije kompleksne geometrije sa zaobljenjima i obične pravokutne geometrije od koje se sastoji nosač stakla, mreža konačnih elemenata se izvela pomoću *Free mesh* tehnike kako bi se smanjio rizik od deformiranih elemenata koji ugrožavaju proračun. Primjer takve mreže nalazi se na slici 79. u nastavku. Za izradu mreže konačnih elemenata koristili su se elementi oznake CPE8, bikvadratni elementi s 8 čvorova za ravninsko stanje deformacija. Ravninsko stanje deformacija nastupa u ovom modelu jer su mu dimenzije presjeka (2-5 mm debljina i 50 mm širina) relativno male u odnosu na duljinu koja iznosi minimalno 100 mm, ovisno o opterećenju stakla.



Slika 79. Primjer mreže konačnih elemenata - Free mesh

Usljed inicijalnih probnih analiza, ustanovljeno je da se najveće naprezanje nalazi na području naslona stakla. Naime, nosač stakla se pod nominalnim opterećenjem deformira i osloni na sklop profila koji se nalazi ispod njega. Time se nosač stakla pretvara iz modela sličnog konzoli u model sličan gredi na dva oslonca i savija se tako da je vlačno naprezanje s donje strane nosača. Na slici 80. prikazana je jedna inicijalna analiza.



Slika 80. Inicijalna analiza

Ovo je ujedno i maksimalno naprezanje koje je dobiveno analizom metodom konačnih elemenata pri opterećenju od 3 metara kvadratnih stakla, odnosno $p = 0,165$ MPa. Granica popuštanja za leguru EN AW 6060 T66 iznosi $R_{p0,2} = 150$ N/mm² prema izjavi o svojstvima koja je dana u prilogu ovom radu. Uz faktor sigurnosti $S=2$ dopušteno naprezanje iznosi:

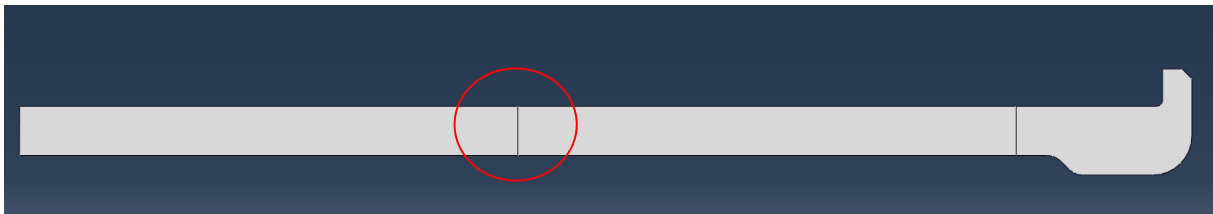
$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p0,2}}{S} = \frac{150}{2},$$

$$\sigma_{dop} = 75 \text{ N/mm}^2. \quad (5.4)$$

$$S_{Mises,max} = 44,206 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{dop} = 75 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{ZADOVOLJAVA.}$$

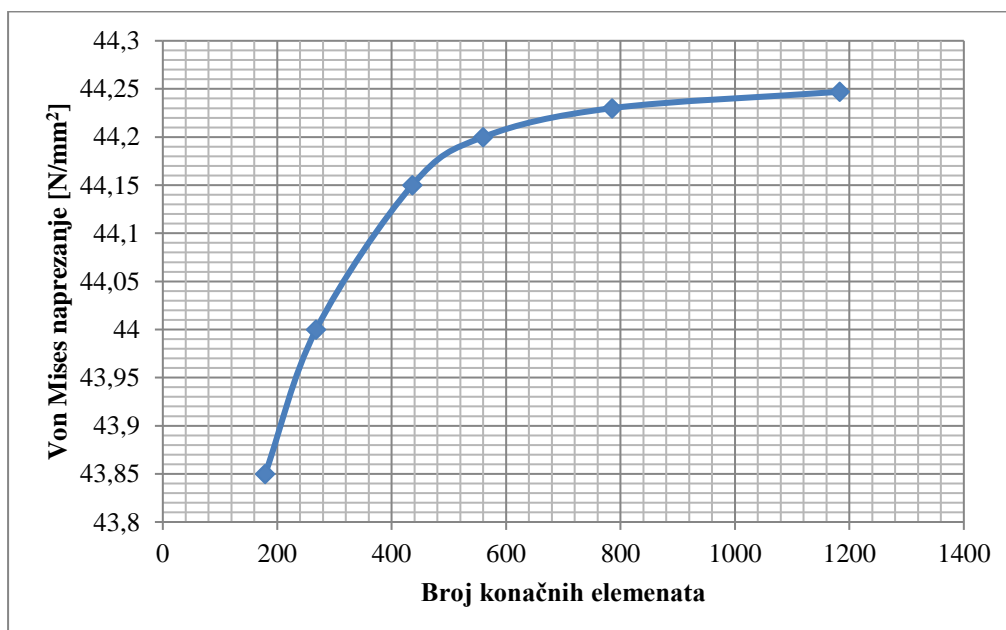
S obzirom da je naprezanje dobiveno analizom metodom konačnih elemenata dosta manje od dopuštenog naprezanja uz faktor sigurnosti $S=2$, dopušteno je korištenje stakla mase 165 kg u element fasadi AK E65 i AK E65S, no za potrebe preciznog dimenzioniranja nosača stakla, potrebno je izraditi detaljniju i detaljniju analizu naprezanja nosivog aluminijskog profila i nosača stakla metodom konačnih elemenata.

Također, bilo je neophodno ispitati konvergenciju modela kako bi se ustanovilo je li valjan. Konvergencija se provjeravala na način da je stvorena particija na mjestu oko najvećeg naprezanja nosača stakla. Navedena particija, zaokružena crvenim krugom, nalazi se na sredini nosača stakla prikazanog na slici 81. u nastavku.



Slika 81. Linija particije za točku određivanja konvergencije

Na donjoj strani linije particije stvorena je točka koja je pretvorena u *Set*. Sa svakom promjenom količine elemenata u mreži konačnih elemenata, određeno je naprezanje u točnoj točki. Ovaj postupak neophodan je da se odredi točna konvergencija, a graf te konvergencije nalazi se na slici 82.



Slika 82. Konvergencija modela

6. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu koji je rađen u suradnji s poduzećem ALU-KON d.o.o. čija je primarna djelatnost izvođenje aluminijsko-staklenih fasada, detaljno su opisane aluminijsko-staklene fasade i osnovni materijali koji ih čine. Opsežno su objašnjene glavne i najbitnije značajke na koje se mora detaljno obraditi pri konstruiranju aluminijsko-staklenih fasada kao što su statička stabilnost, toplinska izolacija i vodonepropusnost i zrakonepropusnost te su prikazani i objašnjeni tipovi aluminijsko-staklenih fasada.

Poduzeće ALU-KON u svom portfelju ima interno razvijene sustave profila za aluminijsko-staklene fasade, koji su u ovom diplomskom radu poboljšani i prilagođeni suvremenijim zahtjevima građevinske industrije. Intelektualno vlasništvo poduzeća ALU-KON prošireno je s još dva nova sustava profila za aluminijsko-staklene fasade kojima je zajednička karakteristika što je s vanjske strane vidljivo samo staklo. Takav tip fasada popularno se naziva strukturalnim i veoma su česta pojava u novijim građevinskim trendovima. Također, razvile su se posebne klizne spojnice za postojeći sustav kontinuirane fasade AK 50 koje značajno skraćuju vrijeme potrebno za montažu kontinuirane aluminijsko-staklene fasade AK 50 i njoj srodne strukturalne fasade AK 50S, kao i bočne vodilice za AK E65 i AK E65S koje povećavaju preciznost pri montaži elemenata na konstrukciju zgrade.

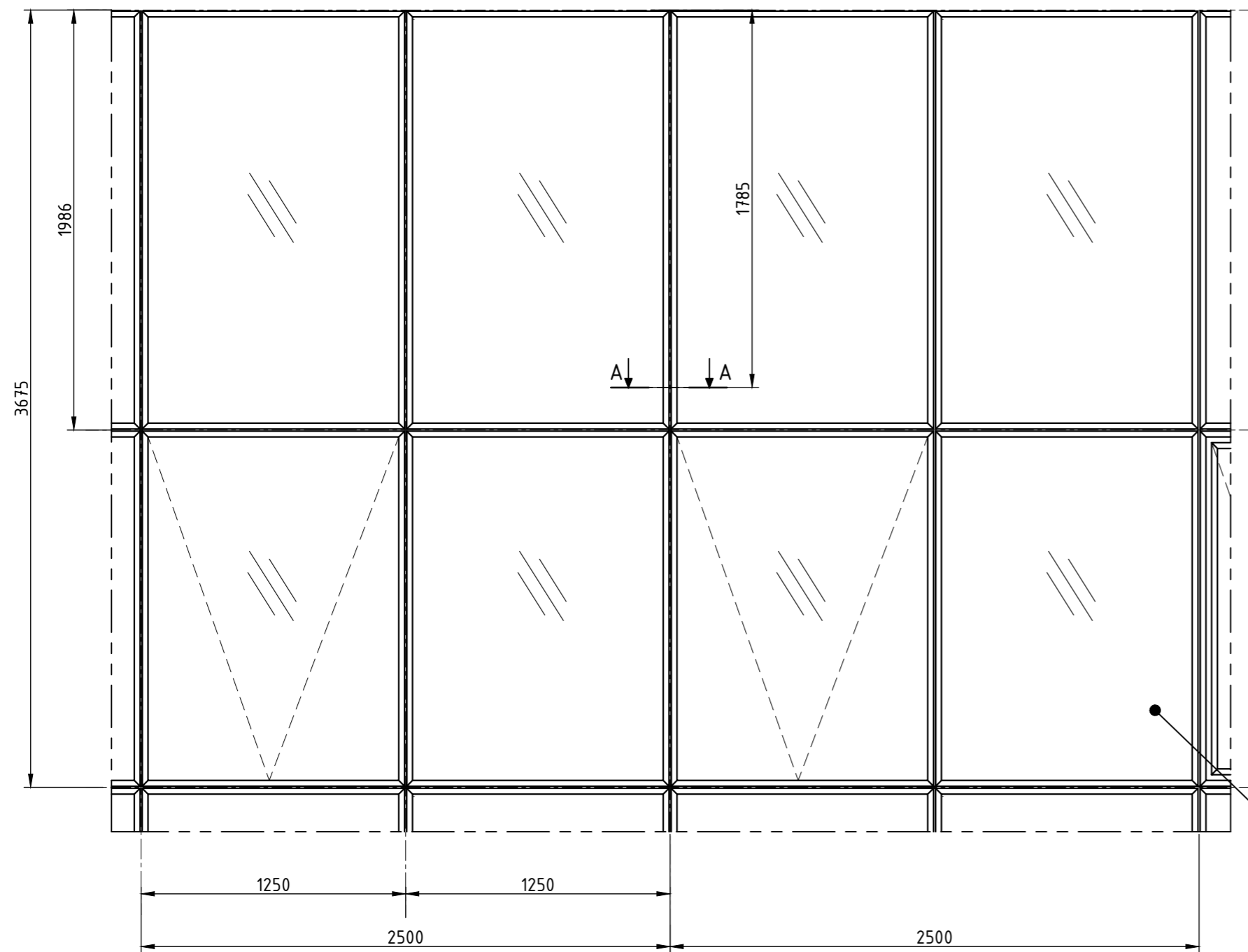
U nastavku rada izrađena je analiza toplinske provodljivosti prekonstruiranih postojećih sustava aluminijsko-staklenih fasada AK 50 i AK E65 kako bi se ispitala izolacijska svojstva novih sustava i rješenja. Analiza je izvedena u softveru CRORAL prema normi EN 10077:2017. Analizom je ustanovljeno da su izolacijska svojstva preoblikovanih sustava profila bolja od originalnih te da postižu vrlo niske koeficijente prolaznosti topline i mogu se primijeniti u bilo kojem području visokogradnje. No za atestiranje sustava, odnosno izrade službene potvrde o svojstvima potrebno je izvesti laboratorijsko ispitivanje koje će utvrditi stvarni ukupni koeficijent prolaznosti topline.

Na kraju je izvršena analiza naprežanja metodom konačnih elemenata na najkritičnijem dijelu u konstrukciji elementa, na nosaču stakla. Dva nosača stakla po jednom polju stakla moraju nositi moderna troslojna IZO stakla koja mogu imati i do 160 kg. Kako bi se utvrdilo da nosači stakla zaista mogu podnijeti tolika opterećenja, modelirao se kontakt između samih nosača stakla i nosivih aluminijskih profila aluminijsko-staklene fasade. Rezultat je zadovoljavajuć, no za točno dimenzioniranje nosača stakla, potrebno je napraviti opsežniju analizu koja će uključivati cijeli presjek nosivog profila aluminijsko-staklene fasade.

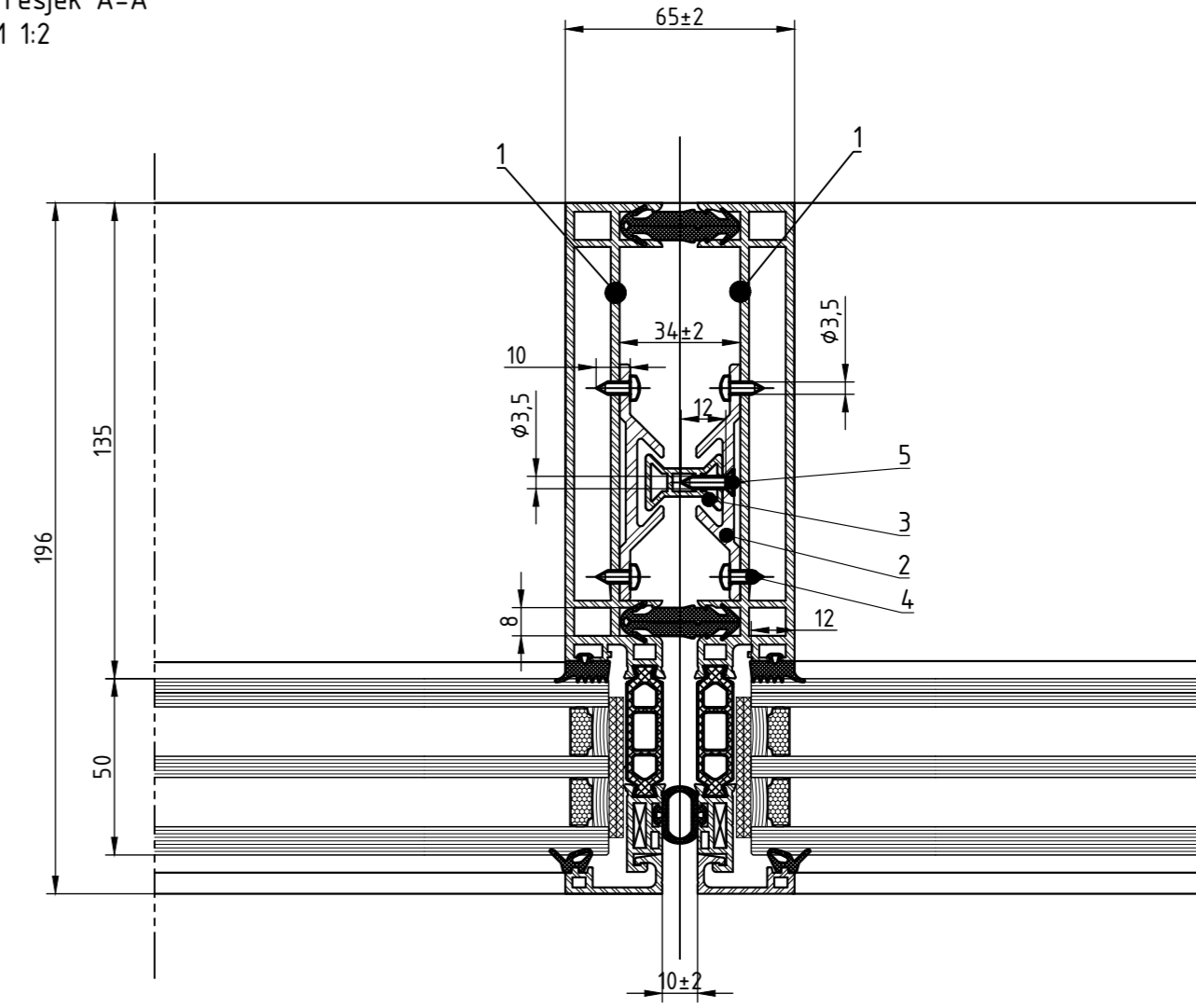
Poduzeće ALU-KON ovim je rješenjima nadogradilo svoje intelektualno vlasništvo koje će pokrenuti razvoj i unapređenja u njegovim ostalim odjelima, što će u konačnici uzrokovati korištenje najsuvremenijih tehnologija, poboljšanje kvalitete proizvoda i poslovanja i otvaranje novih tržišta po Europi.

LITERATURA

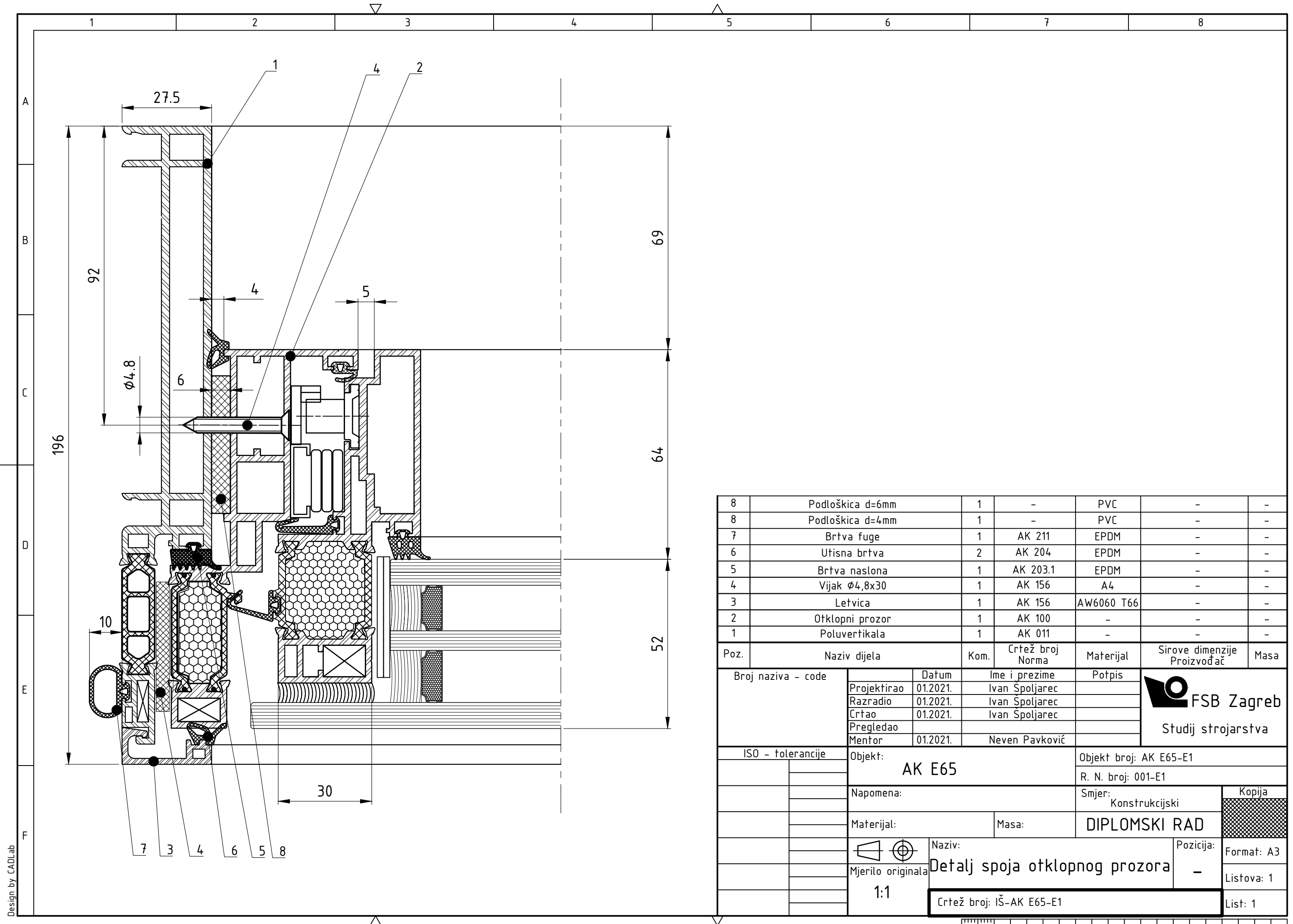
- [1] www.alukoenigstahl.de
- [2] www.agc-glass.eu
- [3] www.aluminiumleader.com/history
- [4] www.wikipedia.org/wiki/History_of_glass
- [5] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [6] www.bwcgroup.co.uk/news/aluminium-extrusion-design-best-practices
- [7] Oberšmit, E.: Osnove konstruiranja, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.
- [8] Silicone structural glazing manual, DOW CORNING, 2018.
- [9] Toplinske značajke prozora, vrata i zaslona -- Proračun koeficijenta prolaska topline -- 2. dio: Numerička metoda za okvire (ISO 10077-2:2012; EN ISO 10077-2:2012)
- [10] Građevni dijelovi i građevni elementi -- Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline -- Metode proračuna (ISO 6946:2017; EN ISO 6946:2017)
- [11] Sorić, J.: Metoda konačnih elemenata, Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.



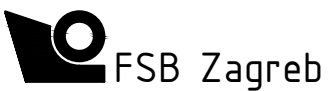
Presjek A-A
M 1:2



5	Samorezni vijak $\phi 3,8 \times 12$	4	DIN 7982	A4	-	-
4	Samorezni vijak $\phi 3,8 \times 10$	8	DIN 7981	A4	-	-
3	Lastin rep	1	AK 118	AW6060 T66	-	-
2	Klizna vodilica	2	AK 117	AW6060 T66	-	-
1	Element E1	4	IS-AK E65-E1	-	3675x2500x400	-
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor			Neven Pavković			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj: AK E65		
		Element fasada AK E65		R. N. broj: 001		
Napomena: -		Smjer: Konstrukcijski		Kopija		
Materijal: -		Masa: -		DIPLOMSKI RAD		
Mjerilo originala		Naziv: Shema spajanja elemenata		Pozicija: -		Format: A2
1:25		Crtež broj: IS - AK E65				Listova: 1
						List: 1

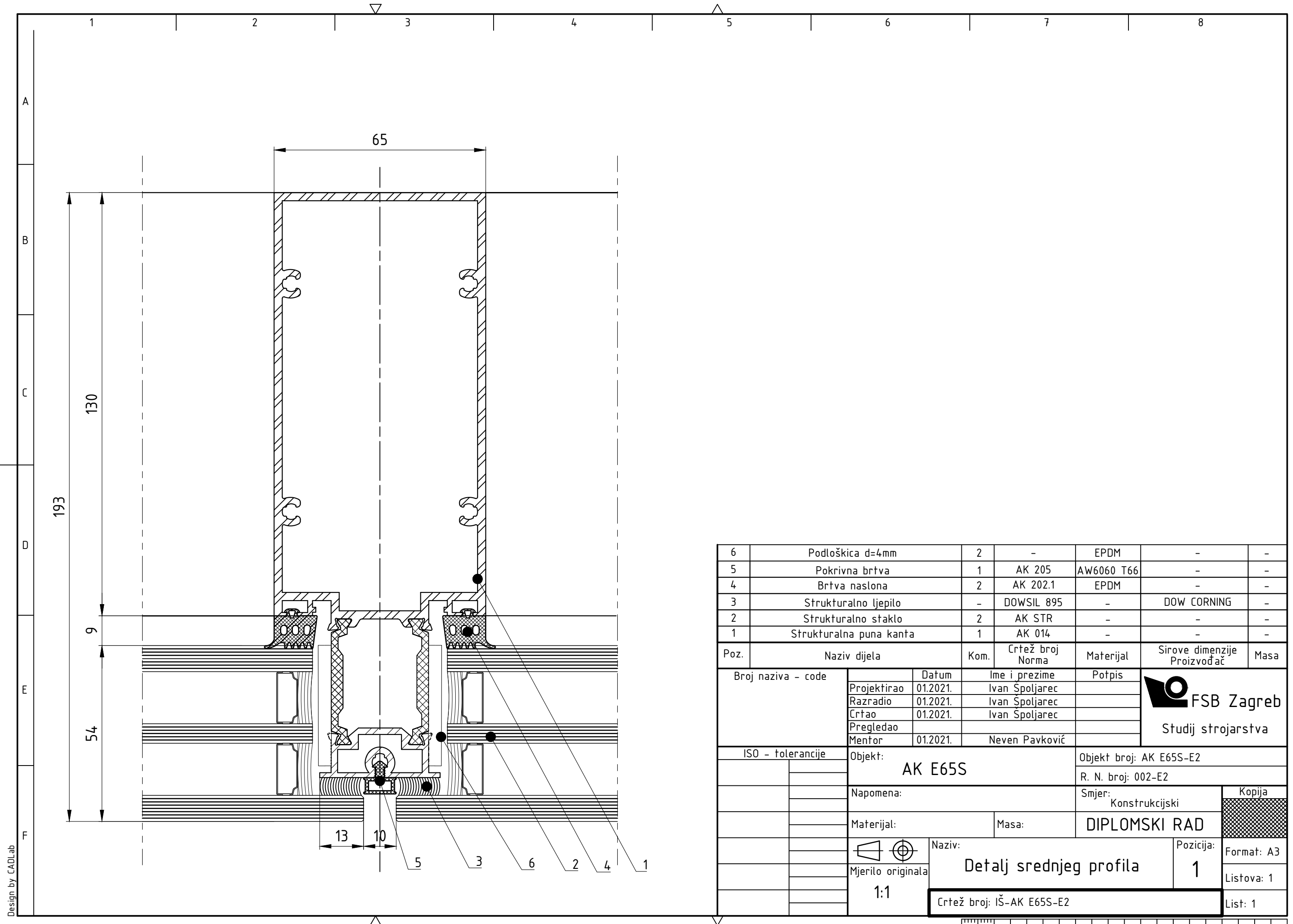



8	Podloškica d=6mm	1	-	PVC	-	-
8	Podloškica d=4mm	1	-	PVC	-	-
7	Brtva fuge	1	AK 211	EPDM	-	-
6	Utisna brtva	2	AK 204	EPDM	-	-
5	Brtva naslona	1	AK 203.1	EPDM	-	-
4	Vijak $\phi 4,8 \times 30$	1	AK 156	A4	-	-
3	Letvica	1	AK 156	AW6060 T66	-	-
2	Otklopni prozor	1	AK 100	-	-	-
1	Poluvertikala	1	AK 011	-	-	-

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 Studij strojarstva	
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor		01.2021.	Neven Pavković			

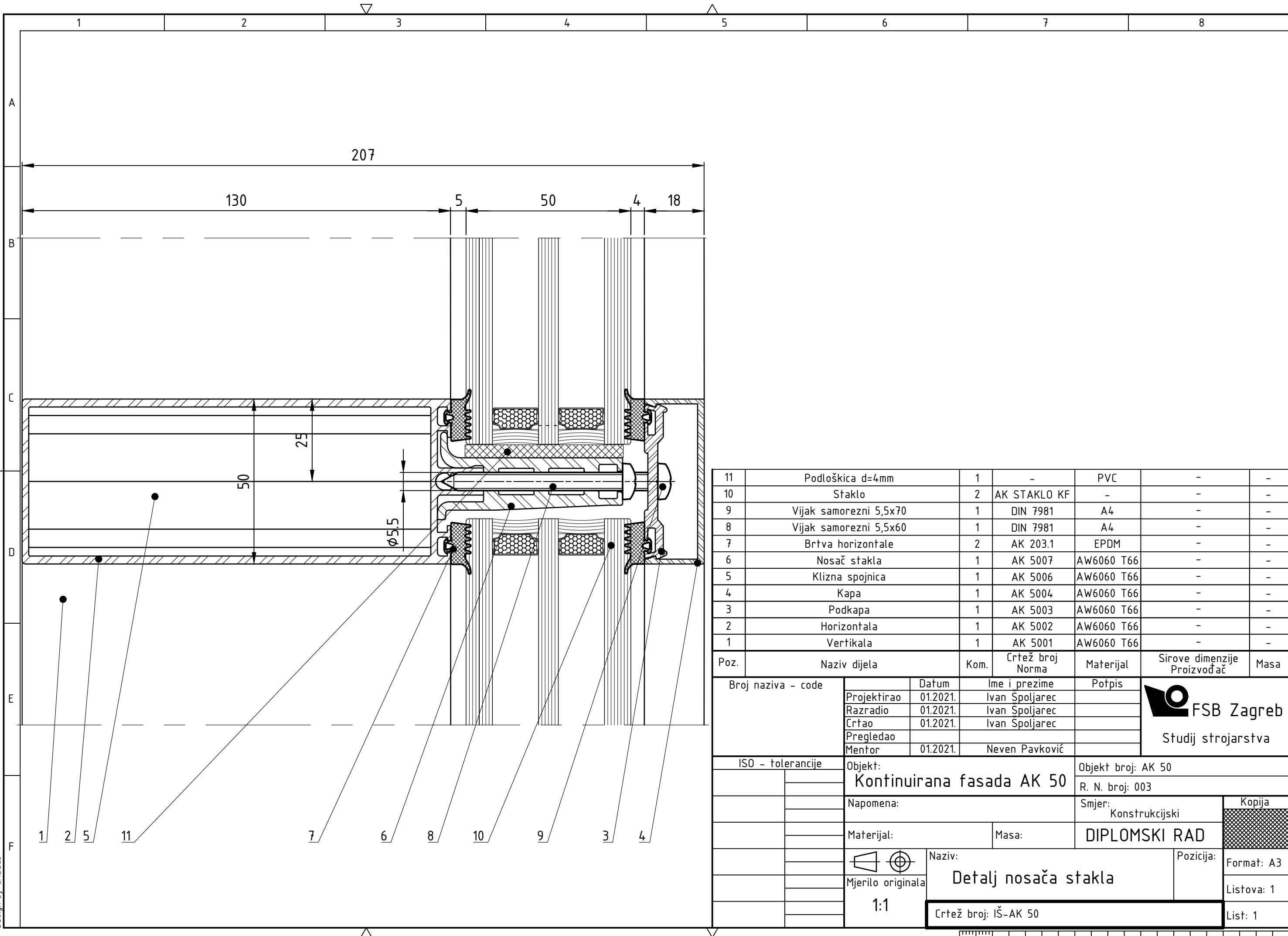
ISO - tolerancije		Objekt: AK E65		Objekt broj: AK E65-E1	
		Napomena:		R. N. broj: 001-E1	
		Materijal:		Smjer: Konstrukcijski	
		Masa:		DIPLOMSKI RAD	
		Naziv: Detalj spoja otklopnog prozora		Kopija	
		Mjerilo originala: 1:1		Format: A3	
		Crtež broj: IŠ-AK E65-E1		Listova: 1	
				List: 1	

Design by CADLab



6	Podloškica d=4mm	2	-	EPDM	-	-
5	Pokrivna brtva	1	AK 205	AW6060 T66	-	-
4	Brtva naslona	2	AK 202.1	EPDM	-	-
3	Strukturalno ljepilo	-	DOWSIL 895	-	DOW CORNING	-
2	Strukturalno staklo	2	AK STR	-	-	-
1	Strukturalna puna kanta	1	AK 014	-	-	-
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor		01.2021.	Neven Pavković			
ISO - tolerancije		Objekt: AK E65S		Objekt broj: AK E65S-E2		
		Napomena:		R. N. broj: 002-E2		
		Materijal:		Smjer: Konstrukcijski		Kopija
		Masa:		DIPLOMSKI RAD		
		Naziv: Detalj srednjeg profila		Pozicija: 1		Format: A3
		Mjerilo originala: 1:1		Crtež broj: IŠ-AK E65S-E2		Listova: 1
						List: 1

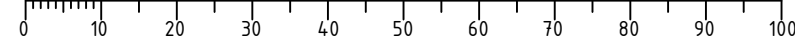
Design by CADLab



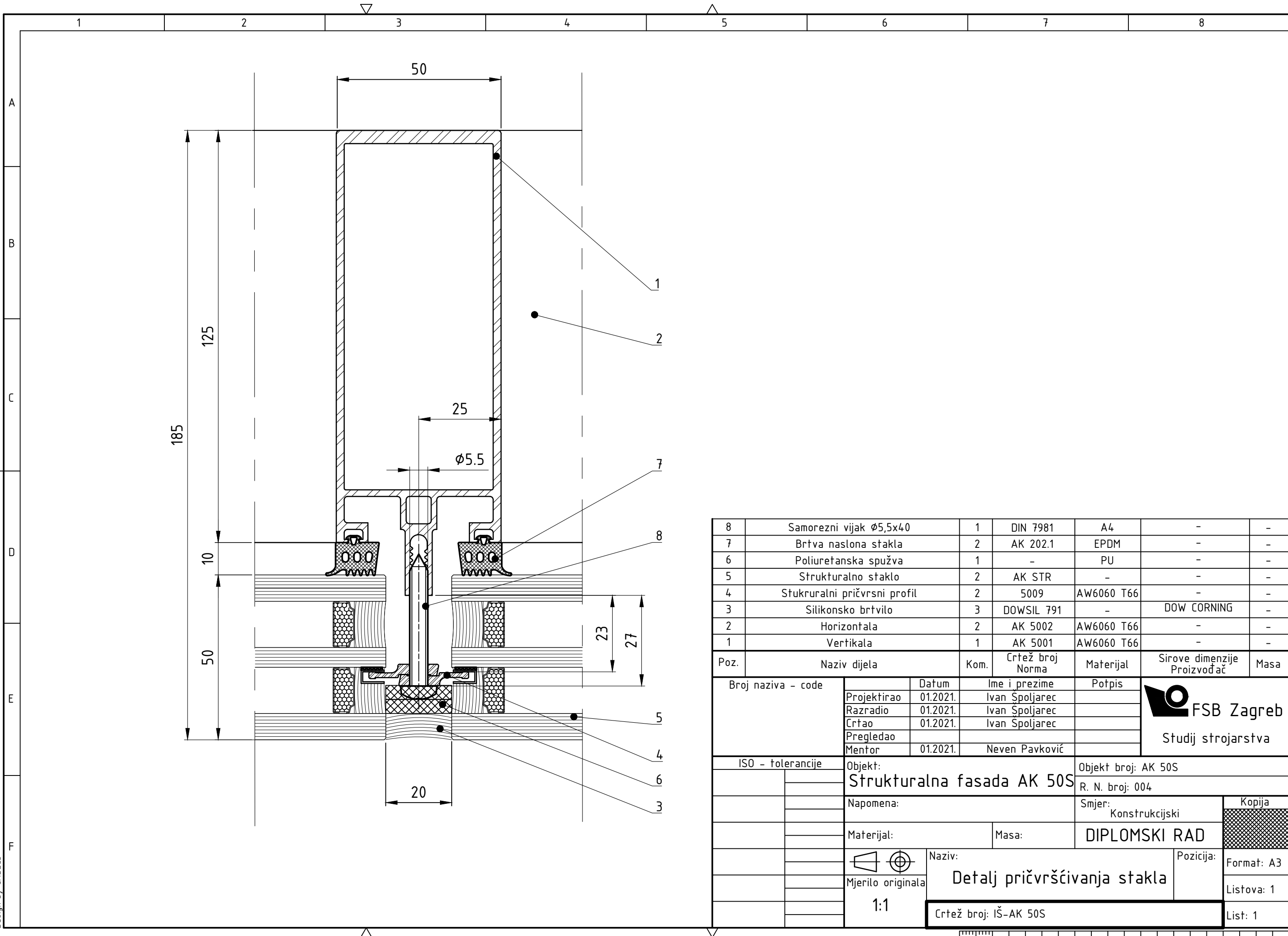
11	Podlošnica d=4mm	1	-	PVC	-	-
10	Staklo	2	AK STAKLO KF	-	-	-
9	Vijak samorezni 5,5x70	1	DIN 7981	A4	-	-
8	Vijak samorezni 5,5x60	1	DIN 7981	A4	-	-
7	Brtva horizontale	2	AK 203.1	EPDM	-	-
6	Nosač stakla	1	AK 5007	AW6060 T66	-	-
5	Klizna spojnica	1	AK 5006	AW6060 T66	-	-
4	Kapa	1	AK 5004	AW6060 T66	-	-
3	Podkapa	1	AK 5003	AW6060 T66	-	-
2	Horizontala	1	AK 5002	AW6060 T66	-	-
1	Vertikala	1	AK 5001	AW6060 T66	-	-

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor		01.2021.	Neven Pavković			

ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj: AK 50	
		Kontinuirana fasada AK 50		R. N. broj: 003	
		Napomena:		Smjer: Konstruktivski	
		Materijal:		Masa: DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:		Pozicija: Kopija	
		Mjerilo originala		Format: A3	
		1:1		Listova: 1	
		Crtež broj: IŠ-AK 50		List: 1	

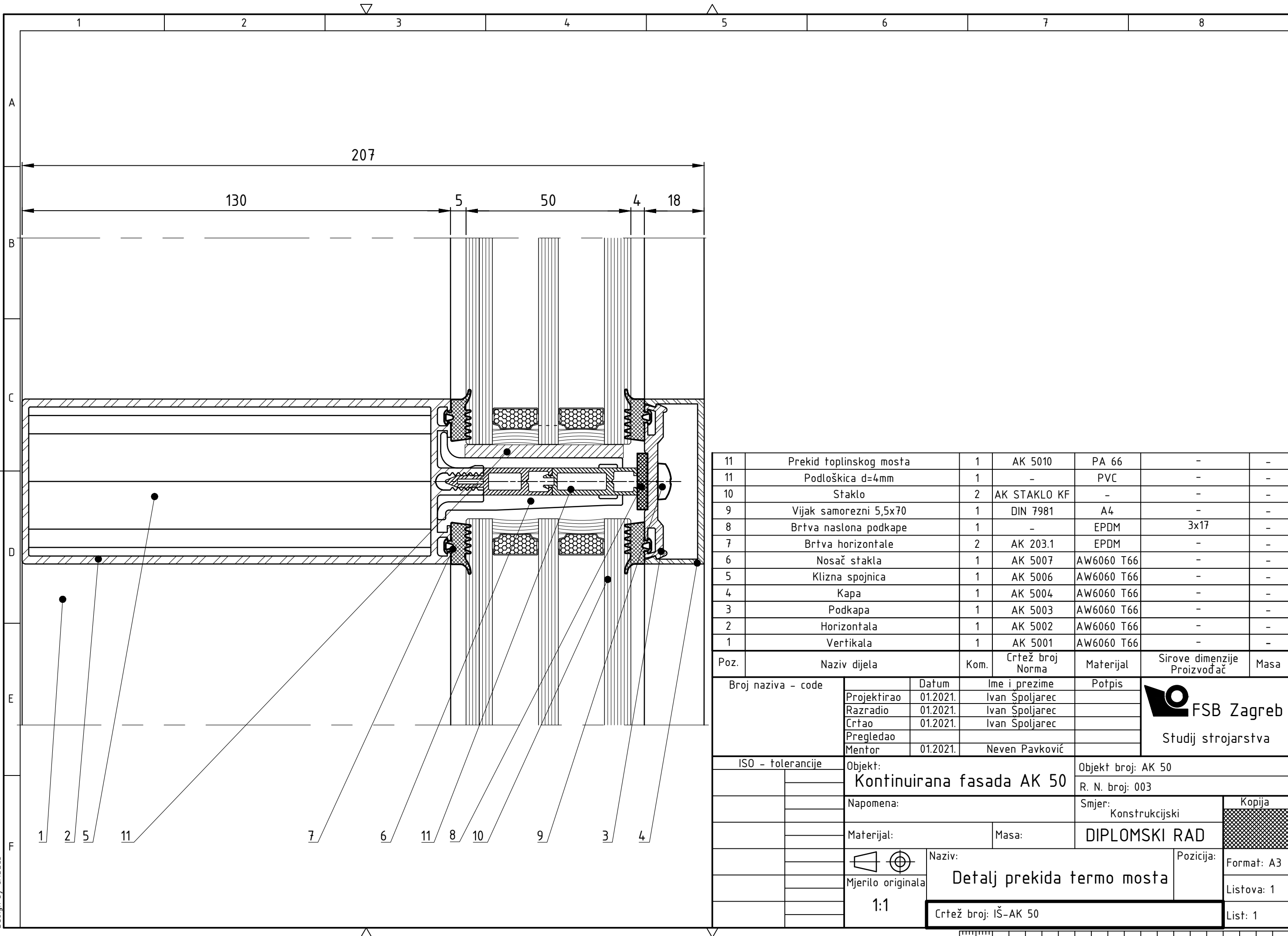


Design by CADLab



8	Samorezni vijak $\phi 5,5 \times 40$	1	DIN 7981	A4	-	-
7	Brtva naslona stakla	2	AK 202.1	EPDM	-	-
6	Poliuretanska spužva	1	-	PU	-	-
5	Strukturalno staklo	2	AK STR	-	-	-
4	Stukruralni pričvršni profil	2	5009	AW6060 T66	-	-
3	Silikonsko brtvilo	3	DOWSIL 791	-	DOW CORNING	-
2	Horizontala	2	AK 5002	AW6060 T66	-	-
1	Vertikala	1	AK 5001	AW6060 T66	-	-
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor		01.2021.	Neven Pavković			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj: AK 50S		
		Strukturalna fasada AK 50S		R. N. broj: 004		
		Napomena:		Smjer: Konstruktivski		Kopija
		Materijal:		Masa:		DIPLOMSKI RAD
		Naziv:		Pozicija:		Format: A3
		Mjerilo originala		Detalj pričvršćivanja stakla		Listova: 1
		1:1		Crtež broj: IŠ-AK 50S		List: 1

Design by CADLab

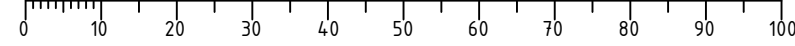


11	Prekid toplinskog mosta	1	AK 5010	PA 66	-	-
11	Podloškica d=4mm	1	-	PVC	-	-
10	Staklo	2	AK STAKLO KF	-	-	-
9	Vijak samorezni 5,5x70	1	DIN 7981	A4	-	-
8	Brtva naslona podkape	1	-	EPDM	3x17	-
7	Brtva horizontale	2	AK 203.1	EPDM	-	-
6	Nosač stakla	1	AK 5007	AW6060 T66	-	-
5	Klizna spojnica	1	AK 5006	AW6060 T66	-	-
4	Kapa	1	AK 5004	AW6060 T66	-	-
3	Podkapa	1	AK 5003	AW6060 T66	-	-
2	Horizontala	1	AK 5002	AW6060 T66	-	-
1	Vertikala	1	AK 5001	AW6060 T66	-	-

Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Razradio		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Crtao		01.2021.	Ivan Špoljarec			
Pregledao						
Mentor		01.2021.	Neven Pavković			



ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj: AK 50	
		Kontinuirana fasada AK 50		R. N. broj: 003	
		Napomena:		Smjer: Konstrukcijski	
		Materijal:		Masa: DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:		Pozicija: Format: A3	
		Mjerilo originala		Listova: 1	
		1:1		List: 1	
		Crtež broj: IŠ-AK 50			



Design by CADLab