

# Unapređenje procesa pripreme agregata na asfaltnim postrojenjima cikličkog tipa povratom ispušnog plina pri proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina

---

Cimbola, Zdravko

Doctoral thesis / Disertacija

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:815919>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-01**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSJEK  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

*Repository / Repozitorij:*

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



**dabar**  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

**Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo**

**Doktorska disertacija**

**Unapređenje procesa pripreme agregata na asfaltnim postrojenjima  
cikličkog tipa povratom ispušnog plina pri proizvodnji vrućih asfaltnih  
mješavina**

**Zdravko Cimbola, dipl. ing. građ.**

**Osijek, 27. veljače 2019. godine**

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek**

**Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering**

**Doctoral dissertation**

**Improvement of the preparing aggregates process on cyclic type asphalt plants using exhaust gas during hot-mix asphalt production**

**Zdravko Cimbola, dipl. ing. grad.**

**Osijek, February 27, 2019**

## **Zahvala**

Posebno zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Zlati Dolaček-Alduk, dipl. ing. građ. sa Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek, što je svojom nesebičnom pomoći i znanjem pomogla u ostvarivanju ovog doktorskog rada.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Sanja Dimter, dipl. ing. građ. sa Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek na korisnim pomoći, literaturi i sugestijama.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Tatjana Rukavina, dipl. ing. građ. sa Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na korisnim savjetima, sugestijama i podršci.

*Posebnu posvetu i zahvalu dajem sinu Borni i  
supruzi Gordani što ste bili podrška svih ovih godina.*

*Hvala vam!*

# Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci

## **Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije**

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorske disertacije imenovano je na *198. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 29. svibnja 2018. g.*, u sastavu:

- 1. Doc. dr. sc. Mario Galić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik;*
- 2. Izv. prof. dr. sc. Zlata Dolaček - Alduk, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, članica;*
- 3. Prof. dr. sc. Tatjana Rukavina, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica.*

Tema, mentorica i komentorica doktorske disertacije prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na *200. redovitoj sjednici održanoj 17. srpnja 2018. g.*

## **Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije**

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije imenovano je na *205. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 19. prosinca 2018. g.*, u sastavu:

- 1. Doc. dr. sc. Mario Galić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik;*
- 2. Izv. prof. dr. sc. Zlata Dolaček - Alduk, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, mentorica i članica;*
- 3. Prof. dr. sc. Tatjana Rukavina, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica.*

Doktorska disertacija prihvaćena je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na *207. redovitoj sjednici održanoj 19. veljače 2019. g.*

## **Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije**

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije imenovano je na *207. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 19. veljače 2019. g.*, u sastavu:

- 1. Doc. dr. sc. Mario Galić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik;*
- 2. Izv. prof. dr. sc. Zlata Dolaček - Alduk, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, mentorica i članica;*
- 3. Prof. dr. sc. Tatjana Rukavina, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, članica*
- 4. Doc. dr. sc. Ivana Barišić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenska članica;*

Doktorske disertacija javno je obranjena 27. veljače 2019. g. na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorska disertacija sadržava 123 stranice, 69 ilustracija, 55 tablica i 83 citiranih publikacija.

Mentorica doktorske disertacije je *izv. prof. dr. sc. Zlata Dolaček-Alduk, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.*

Komentorica doktorske disertacije je *prof. dr. sc. Sanja Dimter, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.*

Istraživanje u okviru doktorske disertacije pripada *znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.*

## **Izjava o akademskoj čestitosti**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorska disertacija isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavio doktorsku disertaciju s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, 29.2.2019. g.

Zdravko Cimbola





# Predgovor

Temeljem istraživanja dolazi se do novih spoznaja i primjene tehnologija. Tehnologije su prisutne u svim sferama ljudskih aktivnosti. Tako i razvojem te primjenom tehnologija u građevinarstvu dolazi se do konstantnih pomaka napredovanja. Svi ti pomaci rezultat su primjene stečenih spoznaja.

Kontinuiranim usavršavanjem, razvijanjem i shvaćanjem potreba oko sebe dolazi se do rezultata napredovanja kroz tehnologiju.

Asfaltne baze kao sofisticirana primjenjena tehnologija proizvodnje asfaltnih mješavina učinila je zadnjih desetaka godina značajne pomake. Tako su razvijeni bolji plamenici, rotacijski bubnjevi, poboljšane su sonde za praćenje temperatura u proizvodnji. Osim mehaničkih dijelova uznapredovali su i software-i praćenja proizvodnje asfaltnih mješavina. Oni u svojim segmentima prate svaki korak proizvodnje te svrsihodno tome putem računala obavljaju analizu mjerenja kod proizvodnje. Također izuzetni koraci napravljeni su u dodacima asfaltnih mješavina. Od dodataka najbitniji je dodatak za snižavanje temperature kod proizvodnje iz razloga smanjenja potrošnje energije.

Temeljem nabrojanih činjenica može se zaključiti da je neophodan razvoj u smjeru smanjenja energija na asfaltnoj bazi. Optimalizacijom proizvodnog procesa potrebno je svesti proizvedenu vruću asfaltnu mješavinu na prihvatljivu razinu potrošnje energije. Jedno od mogućih poboljšanja je upravo u predsušenju agregata prije proizvodnje. Kako se tijekom proizvodnje vruće asfaltne mješavine troši izuzetna količina energenta (plin, lož ulje, ...) u konačnici u atmosferi završava velika količina plina temperatura u rasponu od 50°C – 100°C i više. Dana je ideja na koji način preuzeti tu temperaturu i staviti je u zatvoreni ciklus proizvodnje. Umjesto kose trake na asfaltnoj bazi instalirala bi se trakasta sušara. Dovodnim cijevima i regulatorima brzine protoka zraka dovela bi se spomenuta temperatura do trakaste sušare. U samoj sušari na više nivoa omogućilo bi se agregatu predsušenje u određenom mogućem vremenu, temperaturi i brzini strujanja zraka.

U laboratoriju je izrađen segment modela trakaste sušare. Laboratorijskim modelom provedena su mjerenja u vremenu koristeći određenu temperaturu i brzinu strujanja zraka. Svaki korišteni agregat za proizvodnju asfaltnih mješavina ima svoj udio vlažnosti. Mjerenjima je jednostavno doći do podatka kolika je vlažnost tog materijala. Na različitim frakcijama

agregata izmjerene su vrijednosti koliko je moguće smanjiti vlagu materijalu. Tako se varijacijama vremena, temperatura i brzini strujanja zraka odredio stupanj smanjenja vlažnosti.

Nakon obavljenih laboratorijskih mjerenja napravljena je matematička analiza. Tom analizom postavljene su jednadžbe ponašanja pojedinih frakcija pri danim uvjetima. U konačnici se došlo do jedinstvene jednadžbe koja najbolje opisuje udio smanjenja vlažnosti korištenog agregata po pojedinim frakcijama.



## Sažetak

Na asfaltnoj bazi koristi se izuzetna količina energije prilikom proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina. Kako se dio energije ispušta u atmosferu ideja prikazana u ovom radu je da tu energiju pretvorimo u zatvoreni ciklus proizvodnje. Stoga se kosa traka na asfaltnoj bazi mijenja s trakastom sušarom.

Pomoću laboratorijskog modela segmenta trakaste sušare provedena su mjerenja. Kao ulazni parametri korišteni su vrijeme, temperatura i brzina strujanja zraka. Na različitim frakcijama agregata obavljena su mjerenja koliko je vlažnosti izgubila koja frakcija agregata.

Matematičkim analizama dobivene su jednadžbe ponašanja sušenja agregata pod zadanim uvjetima. Jednadžbama je definiran model sušenja agregata. Također je ispitivan i utjecaj prionjivosti bitumena i agregata s ispušnim plinom.

Ključne riječi: agregati, vlaga, asfaltna mješavina, sušenje, brzina strujanja zraka, temperatura, vrijeme izloženosti, prionjivost

# Abstract

Exceptional amount of energy is used on the asphalt plant when producing hot asphalt mixtures. As part of the energy is released into the atmosphere, the idea presented in this paper is to turn this energy into a closed cycle of production. Therefore, the belt conveyor on the asphalt plant changes with a belt conveyor drying chamber.

Measurements were made using a laboratory model of the belt conveyor drying chamber segment. The input parameters used were time, temperature and air flow rate. Different aggregate fractions performed measurements of how much moisture the aggregate fraction lost. Mathematical analyzes yielded aggregate drying behavior equations under the given conditions. The equations have a model for drying the aggregates. The impact of bituminous aggregates and exhaust gas aggregates has also been investigated.

Key words: aggregates, humidity, asphalt mixtures, drying, air flow rate, temperature, time, affinity



# Sadržaj

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci.....	I
Izjava o akademskoj čestitosti.....	III
Predgovor.....	V
Sažetak.....	VII
Abstract.....	VIII
Sadržaj.....	X
Popis slika.....	XIII
Popis tablica.....	XVI
Popis kratica i simbola.....	XIX
<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
1.1. Hipoteza i cilj rada	2
1.2. Struktura rada	3
<b>2. GOSPODARENJE ENERGIJOM U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA</b>	<b>5</b>
2.1. Uvod	5
2.2. Plin	6
2.2.1. Općenito o prirodnom plinu	7
2.2.2. Prirodni plin u Hrvatskoj	9
2.3. Karakteristike prirodnog plina	11
2.4. Zakonska regulativa onečišćenja	12
2.5. Gospodarenje energijom u industrijskim procesima	13
2.6. Očuvanje energije u procesnoj industriji	14
2.6.1. Mjere u energetici	16
2.6.2. Pregled najčešćih gubitaka	17
<b>3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA</b>	<b>19</b>
3.1. Dosadašnja istraživanja mogućnosti uštede energije u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina	19
3.2. Dosadašnja istraživanja mogućnosti uštede energije proizvodnjom toplih asfaltnih mješavina	24
<b>4. PROIZVODNJA ASFALTNIH MJEŠAVINA</b>	<b>26</b>
4.1. Postupci proizvodnje asfaltnih mješavina	26
4.2. Posebnosti proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina	29



4.3. Ocjena kvalitete asfaltnih mješavina	32
4.4. Smještaj i kapaciteti asfaltnih baza u Hrvatskoj	35
4.5. Količina proizvodnje asfaltnih mješavina	40
<b>5. KOLIČINE EMISIJA S ASFALTNIH BAZA U HRVATSKOJ</b>	<b>43</b>
5.1. Analiza ispušnih plinova kod proizvodnje	43
5.2. Analiza ispušnih plinova prema proizvedenoj količini mješavina	47
<b>6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA</b>	<b>52</b>
6.1. Metodologija istraživanja	52
6.2. Laboratorijska oprema i resursi	53
6.3. Uzorkovanje i priprema uzoraka	53
6.3.1. Odrađivanje veličine i mase ispitnih uzoraka	57
6.4. Ispitivanje sušenjem	58
6.5. Rezultati ispitivanja	64
6.6. Postupak smanjenja vlažnosti tijekom vremena	76
<b>7. OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA</b>	<b>79</b>
7.1. Uvodne napomene	79
7.2. Izvođenje jednadžbi	80
7.2.1. Jednadžba za frakciju 0/2	80
7.2.2. Jednadžba za frakciju 2/4	84
7.2.3. Jednadžba za frakciju 4/8	88
7.2.4. Jednadžba za frakciju 8/11	92
7.2.5. Jednadžba za frakciju 0/11 RA	96
7.2.6. Jednadžba za različite debljine slojeva	101
7.3. Sumarni pregled dobivenih rezultata ispitivanja	105
7.4. Prionjivost agregata i bitumena	107
7.5. Mogućnost primjene koncepta na postrojenju asfaltne baze	110
<b>8. ZAKLJUČCI</b>	<b>113</b>
<b>9. LITERATURA</b>	<b>117</b>



## Popis slika

Slika 2-1: Projekcija potrošnje plina u Republici Hrvatskoj	9
Slika 2-2: Procjena domaće proizvodnje prirodnog plina u razdoblju do 2030. godine	10
Slika 2-3: Ovisnost RH o uvozu energije	10
Slika 4-1: Načini doziranja RAA na asfaltnoj bazi	28
Slika 4-2: Doziranje sa paralelnim bubnjem RAA na asfaltnoj bazi	28
Slika 4-3: Frakcije kamenih materijala	32
Slika 4-4: Shematski prikaz asfaltne baze s pojedinim elementima	33
Slika 4-5: Primjer izrade ocjene sukladnosti asfaltne mješavine	34
Slika 4-6: Sučelje aplikacije „QColas“	34
Slika 4-7: Raspored asfaltnih baza središnje Hrvatske	35
Slika 4-8: Raspored asfaltnih baza istočne Hrvatske	35
Slika 4-9: Raspored asfaltnih baza regije Istre, Primorja i Like	36
Slika 4-10: Raspored asfaltnih baza regije Dalmacije i Dubrovačkog primorja	36
Slika 4-11: Postotak udjela asfaltnih baza prema kapacitetu	39
Slika 4-12: Trend proizvodnje asfaltnih mješavina	40
Slika 4-13: Trend proizvodnje asfaltnih mješavina u Europi	42
Slika 5-1: Otvoreni plamen iz plamenika usmjeren u rotacijski bubanj	43
Slika 5-2: Asfaltna baza Lepoglava u Lepoglavi (COLAS Hrvatska d.d.)	44
Slika 5-3: Asfaltna baza Motičnjak u Varaždinu (COLAS Hrvatska d.d.)	45
Slika 5-4: Asfaltna baza Posedarje u Posedarju (COLAS Hrvatska d.d.)	45
Slika 5-5: Asfaltna baza Ploče u mjestu Kula Norinska (COLAS Hrvatska d.d.)	45
Slika 6-1: Deponije kamenih materijala (AB Motičnjak, COLAS Hrvatska d.d.)	54
Slika 6-2: Deponija reciklažnog asfaltnog agregata (AB Lepoglava)	54
Slika 6-3: Prikaz načina uzrokovanja s deponije	55
Slika 6-4: Shematski prikaz dijelova deponija oblika stošca uslijed segregacije agregata	55
Slika 6-5: Shematski prikaz četvrtanja agregata	56
Slika 6-6: Homogenizirani i pripremljeni uzorak za ispitivanje	56
Slika 6-7: Dimenzije kose trake s materijalom	57
Slika 6-8: Određivanje ulaznih parametara laboratorijskog modela sušare	58
Slika 6-9: Određivanje mase uzorka prije ispitivanja vaganjem	59
Slika 6-10: Uzorak u komori	60

Slika 6-11: Namještanje parametara i ispitivanje	60
Slika 6-12: Shema ispitivanja	62
Slika 6-13: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/2 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s	65
Slika 6-14: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/2 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	65
Slika 6-15: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/2 s pripadajućim vremenima pri 3,86 m/s	67
Slika 6-16: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/2 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	67
Slika 6-17: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 2/4 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s	69
Slika 6-18: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 2/4 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	69
Slika 6-19: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 4/8 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s	71
Slika 6-20: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 4/8 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	71
Slika 6-21: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 8/11 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s	73
Slika 6-22: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 8/11 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	73
Slika 6-23: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s	75
Slika 6-24: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/11 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s	75
Slika 6-25: Uređaj za ispitivanje vlažnosti	76
Slika 6-26: Dijagram smanjenja vlažnosti frakcije 8/11	78
Slika 7-1: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/2 s prikazanom regresijom	80
Slika 7-2: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 0/2 s prikazanom regresijom	81
Slika 7-3: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 0/2 s prikazanom regresijom	82
Slika 7-4: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 2/4 s prikazanom regresijom	84
Slika 7-5: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 2/4 s prikazanom regresijom	85
Slika 7-6: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 2/4 s prikazanom regresijom	86

Slika 7-7: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 4/8 s prikazanom regresijom	88
Slika 7-8: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 4/8 s prikazanom regresijom	89
Slika 7-9: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 4/8 s prikazanom regresijom	90
Slika 7-10: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 8/11 s prikazanom regresijom	92
Slika 7-11: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 8/11 s prikazanom regresijom	93
Slika 7-12: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 8/11 s prikazanom regresijom	94
Slika 7-13: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom	97
Slika 7-14: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom	98
Slika 7-15: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom	99
Slika 7-16: Dijagram umanjene vlažnosti i debljine promatranog sloja	102
Slika 7-17: Dijagram koeficijenata i debljine slojeva	103
Slika 7-18: Stupanj prionjivosti agregata i bitumena	108
Slika 7-19: Uzorak nakon 6 sati ispitivanja prionjivosti agregata i bitumena	109
Slika 7-20: Kosa transportna traka na asfaltnoj bazi	110
Slika 7-21: Shematski prikaz smještaja trakaste sušare na asfaltnoj bazi (umjesto kose trake)	111
Slika 7-22: Shematski prikaz trakaste sušare	111

## Popis tablica

Tablica 2-1: Zalihe stanja plina po državama	8
Tablica 2-2: Standardna kvaliteta prirodnog plina	11
Tablica 4-1: Temperature kod proizvodnje asfaltnih mješavina	26
Tablica 4-2: Prikaz regije 1 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu	37
Tablica 4-3: Prikaz regije 2 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu	38
Tablica 4-4: Prikaz regije 3 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu	38
Tablica 4-5: Prikaz regije 4 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu	39
Tablica 4-6: Proizvodnja asfaltnih mješavina od 2008 do 2016 godine u Hrvatskoj	40
Tablica 4-7: Proizvodnja asfaltnih mješavina u državama Europe	41
Tablica 5-1: Rezultati mjerenja ispušnih plinova na asfaltnim bazama	46
Tablica 5-2: Rezultati mjerenja ostalih parametara na asfaltnim bazama	46
Tablica 5-3: Podaci o proizvodnji i utrošenoj energiji asfaltnih baza COLAS Hrvatska d.d.	47
Tablica 5-4: Faktori emisije	48
Tablica 5-5: Faktori oksidacije ugljika	48
Tablica 5-6: Vrste goriva i približne donje ogrjevne vrijednosti	49
Tablica 5-7: Faktori emisije CO <sub>2</sub> za pojedinu vrstu goriva	49
Tablica 5-8: Rezultati izračuna onečišćujućih tvari asfaltnih baza COLAS Hrvatska d.d.	50
Tablica 5-9: Orijehtacijski rezultati izračuna onečišćujućih tvari iz ukupne proizvodnje sa svih asfaltnih baza u RH	50
Tablica 5-10: Orijehtacijski udio CO <sub>2</sub> iz proizvodnje mješavina	51
Tablica 6-1: Ulazni parametri laboratorijske komore	59
Tablica 6-2: Ispitani uzorci s odabranim parametrima	63
Tablica 6-3: Rezultati ispitivanja frakcije 0/2 Špica	64
Tablica 6-4: Rezultati ispitivanja frakcije 0/2 Špica s povećanom vlažnosti	66
Tablica 6-5: Rezultati ispitivanja frakcije 2/4 Hrušovec	68
Tablica 6-6: Rezultati ispitivanja frakcije 4/8 Špica	70
Tablica 6-7: Rezultati ispitivanja frakcije 8/11 Špica	72
Tablica 6-8: Rezultati ispitivanja frakcije 0/11 reciklažni asfaltni agregat	74
Tablica 6-9: Rezultati ispitivanja frakcije 8/11 iz kamenoloma Hrušovec	77
Tablica 7-1: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 0/2	80

Tablica 7-2: Temperaturni koeficijenti frakcije 0/2	81
Tablica 7-3: Koeficijenti brzine frakcije 0/2	82
Tablica 7-4: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 0/2 Špica	83
Tablica 7-5: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 2/4	84
Tablica 7-6: Temperaturni koeficijenti frakcije 2/4	85
Tablica 7-7: Koeficijenti brzine frakcije 2/4	86
Tablica 7-8: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 2/4 Hruškovec	87
Tablica 7-9: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 4/8	88
Tablica 7-10: Temperaturni koeficijenti frakcije 4/8	89
Tablica 7-11: Koeficijenti brzine frakcije 4/8	90
Tablica 7-12: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 4/8 Špica	91
Tablica 7-13: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 8/11	92
Tablica 7-14: Temperaturni koeficijenti frakcije 8/11	93
Tablica 7-15: Koeficijenti brzine frakcije 8/11	94
Tablica 7-16: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 8/11 Špica	95
Tablica 7-17: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 RA	96
Tablica 7-18: Temperaturni koeficijenti frakcije 0/11 RA	97
Tablica 7-19: Koeficijenti brzine frakcije 0/11 RA	99
Tablica 7-20: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 0/11 RA	100
Tablica 7-21: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja različitih debljina slojeva frakcije 0/2	101
Tablica 7-22: Koeficijenti kvocijenata za različite debljine	105
Tablica 7-23: Usporedba rezultata eksperimentalnog i matematičkog modela različitih debljina slojeva frakcije 0/2	104
Tablica 7-24: Matematički prikaz jednadžbi frakcija	105
Tablica 7-25: Matematički prikaz jednadžbi debljine sloja	105
Tablica 7-26: Prikaz koeficijenata osnovnih jednadžbi	106
Tablica 7-27: Rezultati ispitivanja prionjivosti bitumena i agregata	108

## **Popis kratica i simbola**

### **Kratice**

AC – asphalt concrete (asfaltbeton)

BBTM - Beton Bitumineux Tres Mince (asfaltbeton za vrlo tanke slojeve)

EN – Europska norma

HAD – Hrvatsko asfaltersko društvo

HMA – Hot mix asphalt (vruća asfaltna mješavina)

GVE – granična vrijednost emisija

ITT – Initial type test (početno ispitivanje tipa)

LNG – Liquefied Natural Gas (ukapljeni prirodni plin)

LPG – Liquefied Petroleum Gas (ukapljeni nafti plin)

RA – Reclaimed asphalt (reciklažni asfaltni agregat)

SMA – Stone mastic asphalt (splitmastikasfalt)

WMA – Warm mix asphalt (topla asfaltna mješavina)

### **Simboli**

A – proizvedena količina asfaltne mješavine

B – količina potrošenog goriva

e – prirodni logaritam (Eulerov broj ili Napierova konstanta)

E – ispuštanje CO<sub>2</sub>

E<sub>i</sub> – ispuštanja onečišćujuće tvari

EF - faktor emisije CO<sub>2</sub>

E<sub>Fi</sub> – faktor emisije

F – faktor oksidacije ugljika

h – debljina promatranog sloja

H<sub>d</sub> – donja ogrjevna vrijednost goriva

m – masa vlažnog materijala

m<sub>SM</sub> – masa suhog materijala

t – vrijeme

T – temperatura

v – brzina strujanja zraka

w – vlažnost materijala



$w_{d/D}$  – umanjena vlažnost određene frakcije

$w_u$  – rezultat umanjene vlažnosti

$w_{0/2}$  – umanjena vlažnost frakcije 0/2

$w_{2/4}$  – umanjena vlažnost frakcije 2/4

$w_{4/8}$  – umanjena vlažnost frakcije 4/8

$w_{8/11}$  – umanjena vlažnost frakcije 8/11

$w_{0/11 RA}$  – umanjena vlažnost frakcije 0/11 RA (reciklažni asfaltni agregat)

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$\beta$  – koeficijent brzine

$\gamma$  – koeficijent promatrane debljine sloja

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  - koeficijenti pripadajućih frakcija



# 1. UVOD

Kako živimo u svijetu u kojem je potreba za energijom sve veća počinjemo se osvrnuti oko sebe tražeći nove izvore i mogućnosti iskorištavanja postojeće energije. Svi proizvodni procesi traže određena davanja energije i optimalna korištenja iste. Potrebno je u proizvodnim segmentima sagledati činjenice koje su vezane uz sami proizvodni proces na način optimalnog korištenja energije uz prisustvo mogućnosti vraćanja iste natrag. Mnogi dosadašnji primjeri u autoindustriji, poljoprivredi, elektrotehnici pokazali su da je izvedivo ponovno koristiti energiju, smanjiti je ili je modificirati na prikladan način. Posljednjih godina sve više smo svjedoci promjena klime na koju utječe čovjek svojim postupcima. Vrijeme je pokazalo da je potrebno koristiti osnovne energije koje su nam svakodnevno prisutne, a ne koristiti samo neobnovljive izvore.

Napreci su vidljivi i u graditeljstvu. Način proizvodnje i korištenja novih materijala ili modifikacija starih pokazala je određene pomake u pogledu ekonomske, ekološke i energetske učinkovitosti (3E). Tako je i način proizvodnje asfaltnih mješavina posljednjih desetak godina kao koncepcija ostao nepromijenjen, ali se primjenom novih tehnologija učinkovitost zamjetno povećava. Učinkovitost se ogleda u smanjenju jedinične potrošnje energije po jedinici proizvoda te u korištenju novih materijala ili uporabom starih (reciklažni asfaltni agregat). Uporabom starih materijala dobiva se višestruka korist. Prije svega nije potrebno koristiti nove prirodne neobnovljive resurse, a u skladu s time ne troši se energija koja je potrebna za oplemenjivanje istih.

Proizvodnja asfaltnih mješavina na asfaltnoj bazi počinje kod preddozatora u kojem se nalaze frakcije kamenih materijala. Svaki preddozator ima beskonačnu traku na koju pada kameni materijal. Trakom upravlja operater asfaltne baze. Nakon doziranja svih potrebnih frakcija kamenih materijala kameni skelet asfaltne mješavine putuje do kose trake, čiji završetak je na ulazu u rotacijski bubanj za sušenje. U rotacijskom bubnju za sušenje kameni materijal se suši i pri tome poprima temperaturu potrebnu za kasniju proizvodnju. Putem elevatora kameni materijal iz bubnja putuje na sita asfaltne baze. Na sitima se u zasebne komore razdvajaju frakcije kamenih materijala. Prema zadanom sastavu asfaltne mješavine na vagu se doziraju komponente frakcija kamenih materijala koje putuju do miješalice. Kameno brašno se dozira iz posebnog spremnika na vagu te putuje do miješalice. Zagrijani bitumen se iz posebnog spremnika dozira na vagu te također nakon vage cjevovodom se dovodi do miješalice. U

miješalici se sve komponente zamiješaju. Proizvedena asfaltna mješavina se skladišti u silosu gotove mješavine iz čega se ispušta u utovarni prostor prijevoznog sredstva [1].

Ekonomičnost procesa proizvodnje asfaltna mješavine svodi se na smanjenje potrošnje energije potrebne prije svega za sušenje, a zatim i zagrijavanje kamenih materijala te konstantno grijanje bitumena. U novije doba napravljeni su pomaci u konstrukciji bubnja za sušenje i plamenika čime se pospješilo sušenje kamenih materijala (agregata) i smanjena je energija za zagrijavanje. Novi materijali koji se koriste kao dodatak bitumenu ili proizvedenoj asfaltnoj mješavini su između ostalih i korisna rješenja za smanjivanje temperatura kod proizvodnje. Spremnik u kojem je skladišten bitumen za proizvodnju asfaltnih mješavina poboljšan je na način izolacije oboda spremnika te sam princip grijanja. Još uvijek se nailazi na nedovoljno izolirane spremnike bitumena kao i na neadekvatan način grijanja čime je jasno potrebna veća ukupna potrošena energija. Dosadašnjim istraživanjima dokazano je da su nadstrešnice korisna rješenja zaštite deponiranog kamenog materijala od direktnih vanjskih vremenskih utjecaja. Ova istraživanja provedena su u svrhu spoznaja koliko je potrebno uložiti energije za sušenje kamenih materijala. Iz rezultata istraživanja je vidljivo da za svaki postotak vlage u kamenu odnosi izrazitu količinu utrošene energije. Također se moglo zaključiti koja su poboljšanja načinjena na samom asfaltnom postrojenju (rotacijski bubanj za sušenje, plamenik).

Kod proizvodnje asfaltnih mješavina se dio energije u obliku temperature ispušnih plinova kroz dimovod ispušta u okoliš. Stoga je potrebno pronaći model na koji način iskoristiti temperaturu u svrhu predušenja kamenih materijala. U ovom radu će se istraživati smanjenje udjela vlažnosti kamenih materijala. Laboratorijskim ispitivanjima i izrađenim modelom simulirat će se korištenje temperature iz dimovoda. Sušenja kamenih materijala odvijati će se u kontroliranim uvjetima temperature, vremena i brzine strujanja zraka. Dobiveni rezultati eksperimentalnog ispitivanja bit će prikazani putem numeričkih modela sa ciljem što boljeg opisivanja ponašanja sušenja kamenih materijala predloženom tehnologijom. Na kraju će se definiranjem jedinstvene jednadžbe opisati tok smanjenja vlage u agregatu.

## **1.1. Hipoteza i cilj rada**

Toplinski kapacitet ispušnog plina moguće je iskoristiti povratom u tehnološki proces pripreme kamenog agregata te na taj način ostvariti znatne uštede energenata u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina na asfaltnim postrojenjima cikličnog tipa.

Cilj rada je na laboratorijskim modelima provesti ispitivanja udjela smanjenja vlažnosti agregata izloženog kratkotrajnom strujanju vrućeg zraka te dokazati koje se vrijednosti mogu postići, što se u konačnici izražava kroz smanjenje jedinične cijene gotovog proizvoda asfalta.

Znanstveni doprinos rada očekuje se u rezultatima ispitivanja režima rada kod pripreme agregata primjenom prototipa trakaste sušare kojim se postotak umanjenja vlažnosti dovodi u vezu s temperaturom, brzinom strujanja i vremenom izloženosti agregata strujanju vrućih ispušnih plinova što ima za posljedice povećanje energetske, ekonomske i ekološke učinkovitosti procesa te prijedlogu izvornog matematičkog modela koji omogućuje proračun i iskaz umanjenja vlažnosti agregata uslijed varijabilne temperature ispušnog plina, različite brzine strujanja i vremena izloženosti agregata ispušnom plinu.

## 1.2. Struktura rada

Sadržajno, rad obuhvaća sljedeća poglavlja:

- 1) Uvodni dio sadrži presjek opis problema koji će se obrađivati u radu te postavljenu hipotezu i cilj rada.
- 2) Drugo poglavlje opisuje način gospodarenja energijom u industrijskim procesima. Sastoji se od pregleda oblika energije koji se koriste u procesnoj industriji, plina kao energenta, zakonskih okvira kvalitete plina, gubitaka u proizvodnji te mogućnostima smanjenja potrošnje energije na asfaltnim bazama. Prikazane su količine proizvodnje plina te zakonska kvaliteta plina. U ovom poglavlju navode se načini gospodarenja energijom u općenito industrijskim procesima. Očuvanje energije u procesnoj industriji prikazuje opise i mogućnosti očuvanja energije s pregledom najčešćih gubitaka.
- 3) U trećem poglavlju daje se pregled dosadašnjih istraživanja o mogućnostima uštede u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina i mogućnostima uštede energije proizvodnjom toplih asfaltnih mješavina.
- 4) U četvrtom poglavlju opisan je način proizvodnje asfalta, instalirani kapaciteti, količina proizvodnje te količina ispušnih plinova. Navedeni su instalirani kapaciteti proizvodnje asfaltnih mješavina te je prikazana količina proizvodnje u Hrvatskoj i Europi. Provedena je analiza ispušnih plinova sa asfaltne baze te ujedno je prikazana i količina ispušnih plinova prema proizvodnji asfaltnih mješavina.
- 5) U petom poglavlju prikazana je analiza emisija ispušnih plinova s asfaltnih baza u Republici Hrvatskoj.

- 6) Šesto poglavlje opisuje postupak ispitivanja korištenjem laboratorijskom modela sušare, te su iskazani rezultati ispitivanja. Prikazan je laboratorijski model opreme za sušenje uzoraka sa detaljnim opisom pripreme uzoraka te samim procesom sušenja. Prikazana su sva provedena ispitivanja sa rezultatima.
- 7) U sedmom poglavlju opisan je postupak obrade podataka obavljenih mjerenja te prikazivanja jednadžbi postavljenih modela. Za svaku ispitanu frakciju kamenog materijala izrađena je jednadžba sušenja. Izrađena je i završna jednadžba ponašanja sušenja pri danim parametrima. Ispitana je prionjivost agregata i bitumena čime je dokazan utjecaj ispušnih plinova na kameni materijal.
- 8) Osmo poglavlje sadrži zaključke o provedenim istraživanjima.

## 2. GOSPODARENJE ENERGIJOM U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA

### 2.1. Uvod

Primarni oblici energije, osim podjele prema sadržaju energije, uobičajeno se dijele s obzirom na dominantnost u primjeni na konvencionalne i nekonvencionalne, a prema iscrpljivosti na obnovljive i neobnovljive. Primarni oblici energije odnosno izvori javljaju se u prirodi ili se u njoj nalaze, a mogu se podijeliti na:

- a) kemijske – fosilna ili klasična goriva, uljni škriljevci, biomase
- b) nuklearne – nuklearna goriva na bazi procesa fisije i fuzije
- c) potencijalne – vodene snage, plima, oseka i valovi
- d) kinetičke – vjetar i valovi
- e) toplinske – toplina mora, geotermalna
- f) zračenja – Sunčevo isijavanje.

Primarnim oblicima energije, uz izuzetak vrućih izvora, ne može se neposredno koristiti bez pretvorbe pa je za njihovu primjenu potrebna transformacija u pogodniji oblik. Pretvorba izvora mora se obaviti zbog nemogućnosti primjene u primarnom obliku, kao i nemogućnost transporta (obnovljivi izvori sunce, vjetar, valovi). Zbog ekonomičnosti mehanička energija pretvara se u električnu te dalekovodima prenosi do stacionarnih potrošača. Mogućnosti pretvorbe pojedinih nositelja energije su slijedeće:

- a) kemijska energija sadržana u fosilnim gorivima procesom izgaranja u odgovarajućim ložištima pretvara se u toplinsku, odnosno unutrašnju energiju
- b) nuklearna energija procesom fisije ili fuzije u reaktorima također se pretvara u toplinsku, odnosno unutrašnju energiju
- c) potencijalna energija vodnih snaga posredstvom vodnih turbina prelazi u mehaničku energiju
- d) kinetička energija vjetra i valova putem zračnih odnosno vodnih turbina kao i vjetrenjača te plutača i pontona prelazi u mehaničku energiju. Valovi osim kinetičke (horizontalno gibanje valova, orbitalno) sadržavaju i potencijalnu (razlika tlaka između valnog brijega i dola) energiju

- e) toplinska energija mora i geotermičkih izvora posredstvom parnih turbina i izmjenjivača topline transformira se u toplinsku energiju
- f) energija zračenja putem kolektora prelazi u toplinsku energiju, a neposrednom primjenom fotočelija dobiva se električna energija.

Primarni oblici energije dijele se s obzirom na dominantnost u primjeni na konvencionalne (to su primarni oblici s prevladavajućom primjenom u širokom vremenskom razdoblju kao npr. fosilna goriva, nuklearna goriva na bazi fisije te vodene snage) i nekonvencionalne (to su one energije za koje se način iskorištavanja još tehnički rješava ili je ekonomski upitan kao npr. fuzija, valovi, plima, oseka, toplina mora itd.).

Prema iscrpljivosti energiju dijelimo na obnovljive i neobnovljive. Osnovna razlika između obnovljivih i neobnovljivih izvora je u stalnosti te u mogućnosti skladištenja i transporta kao i u investicijama za izgradnju, pogon i održavanje. Upotreba primarnih oblika energije ovisi o tehničkom rješenju kao i ekonomičnosti iskorištavanja [2].

## 2.2. Plin

Osnovne podjele plina u tzv. plinskoj terminologiji izrađene su prema načinu pridobivanja, fizikalno-kemijskim karakteristikama, parametrima izgaranja, koje u praksi impliciraju kategorizaciju plinskih trošila i opreme. Klasifikacija plinova prema načinu pridobivanja:

- eksploatacijom iz polja prirodnog plina te procesa eksploatacije sirove nafte (izdvajanjem plina u procesu čišćenja nafte) – prirodni plin
- iz rafinerije-rafinerijskom preradom sirove nafte i frakcionom destilacijom bogatog prirodnog plina (degazolinaža)– ukapljeni naftni plin
- preradom iz ugljena – gradski plin (ne koristi se u Republici Hrvatskoj)
- tehnološkim procesima bio mase – bioplin.

Prirodni plin, naziva se još i zemni plin, uz naftu i ugljen jedan je od najbitnijih i najraširenijih energenata na svijetu. Upotrebljava se u svim granama industrije za proizvodnju električne energije, za toplinske potrebe i kao gorivo za pogon motornih vozila. Često se pojavljuje otopljen u nafti, ali najčešće u plinskim ležištima. U prirodnom stanju pronalazi se kao smjesa ugljikovodika, obradom se izdvajaju teže frakcije kao što su propan i butan te viši ugljikovodici kako bi ostao metan. Metan karakterizira svojstvo da je bez boje, okusa i mirisa, a iako je neotrovan, pri eksploataciji mu se dodaje karakterističan miris (etil-merkaptan) kako



bi se otkrilo moguće istjecanje u prostor, budući da je pomiješan sa zrakom relativno niske granice eksplozivnosti. Do potrošača se dovodi plinovodima i specijalnim tankerima u kojima se ukapljuje, a tada nastaje tzv. ukapljeni prirodni plin (engl. LNG – *Liquified Natural Gas*) koji treba razlikovati od ukapljenog naftnog plina (LPG – *Liquified Petroleum Gas*) [3].

### 2.2.1. Općenito o prirodnom plinu

Dugo vremena se mislilo da je prirodni plin beskoristan. Čak i danas se u nekim državama rješavaju tog plina tako da ga spaljuju u velikim bakljama. Glavnim dijelom sačinjen je od metana. Metan je visoko zapaljiv i izgara gotovo potpuno. Nakon izgaranja ne ostaje pepela, a zagađivanje zraka je vrlo malo. Prirodni plin nema boje, okusa, mirisa ni oblika u svojoj prirodnoj formi, pa je prema tome ljudima neprimjetan. Zbog toga im kompanije dodaju kemikaliju koja ima miris. Taj miris omogućava ljudima laku detekciju puštanja plina u kući.

Godine 1821. u Fredonia, New York, William A. Hart izbušio je 27 stopa (8,23 m) duboku bušotinu s ciljem povećanja protoka prirodnog plina na površinu. Zbog toga se ta godina uzima kao početak namjernog iskorištavanja prirodnog plina [4]. U 19. stoljeću prirodni plin korišten je gotovo isključivo za ulične svjetiljke. U to vrijeme nije još bilo plinovoda i masovna distribucija po kućanstvima nije bila moguća. Oko 1890. godine većina gradova počela je koristiti električnu energiju za rasvjetu, pa su proizvođači prirodnog plina počeli tražiti nova tržišta za svoj proizvod. 1885. godine Robert Bunsen izumio je plamenik koji je miješao zrak s prirodnim plinom. Taj izum omogućio je iskorištavanje prirodnog plina za kuhanje i grijanje prostorija. Prvi značajniji plinovod izgrađen je 1891. godine. Bio je dug 120 milja (cca. 193 km) i prenosio je plin iz središnje Indiane u Chicago (SAD). Nakon toga sagrađeno je vrlo malo plinovoda sve do kraja drugog svjetskog rata. Tokom drugog svjetskog rata došlo je do velikog napretka u svojstvima metala, tehnikama zavarivanja i izrađivanja cijevi, pa je izgradnja plinovoda postala ekonomski vrlo privlačna, a samim time i upotreba plina u gospodarstvu i domaćinstvima [4].

U mnogo slučajeva prirodni plin je idealno fosilno gorivo jer je prilično čist, jednostavan za transport i komforan za upotrebu. Čišći je od nafte i ugljena, pa se sve više spominje i kao rješenje za postojeće klimatske promjene i probleme sa lošom kvalitetom zraka. Za razliku od nafte i ugljena, prirodni plin ima veći omjer vodik/ugljik i ima manju emisiju ugljičnog dioksida u atmosferu za istu količinu energije.

Kod vađenja prirodnog plina još uvijek postoje limiti zbog današnje tehnologije. Prirodni plin se ne nalazi samo u džepovima, nego se u mnogo slučajeva nalazi s naftom. Često se i nafta i prirodni plin izvlače iz istog nalazišta. Kao i kod proizvodnje nafte, dio prirodnog plina samostalno dolazi na površinu zbog velikog pritiska u dubinama. Ti tipovi plinskih bušotina zahtijevaju sustav cijevi za kontrolu protoka plina. Sve je manje takvih bušotina jer je većina ovog „jeftinog“ plina već izvađena. Prirodni plin se pronalazi u različitim podzemnim formacijama. Neke su formacije teže i skuplje za iskorištavanje, ali ostavljaju prostor za poboljšanje opskrbe plinom u budućnosti. Nakon što se prirodni plin izvuče na površinu, preko sustava plinovoda se dovodi u spremnike, a nakon toga i do krajnjih potrošača.

Smanjeni loš utjecaj na okoliš i napredak u tehnologiji učinili su prirodni plin preferiranim gorivom. U proteklih deset godina proizvodnja prirodnog plina je u stalnom porastu. Prema istraživanjima u 1999. godini je potrošnja prirodnog plina bila oko 2,4 trilijuna metara kubnih, što je napredak od 4.1% u odnosu na 1996. godinu [4]. Trendovi pokazuju da će se to stalno povećavanje proizvodnje nastaviti u dolazećim godinama jer se preferiraju goriva s manje ugljika [4].

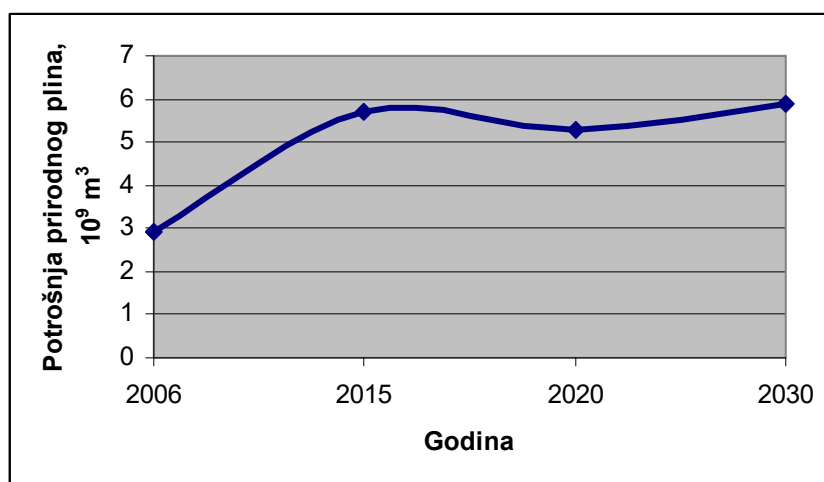
Tablica 2-1: Zalihe stanja plina po državama [4]

Država	Zalihe (u trilijunima m <sup>3</sup> )
Rusija	47,7
Iran	24,3
Katar	10,9
Ujedinjeni Aramski Emirati	6,0
Saudijska Arabija	5,8
Sjedinjene Američke Države	4,7
Alžir	4,5
Venezuela	4,2
Nigerija	3,5
Irak	3,1
Ostale zemlje	36,7

U tablici 2-1 navedene su potvrđene zalihe prirodnog plina u pojedinim državama. Zalihe su prilično velike, ali nisu beskonačne. Rusija prednjači u zalihama, a slijede je države srednjeg istoka. Za sada su zemlje srednjeg istoka više koncentrirane na proizvodnju nafte pa je proizvodnja plina kod njih mala. To im daje veliki potencijal u budućnosti, jer kad iskoriste naftu njihove ekonomije će se prebaciti na proizvodnju prirodnog plina. Trenutno su najveći proizvođači prirodnog plina na godišnjoj razini Rusija sa 590 milijardi m<sup>3</sup> i SAD sa oko 530 milijardi m<sup>3</sup>. SAD su najveći potrošač sa oko 620 milijardi m<sup>3</sup>, a slijedi ih Rusija sa 395 milijardi m<sup>3</sup> [4].

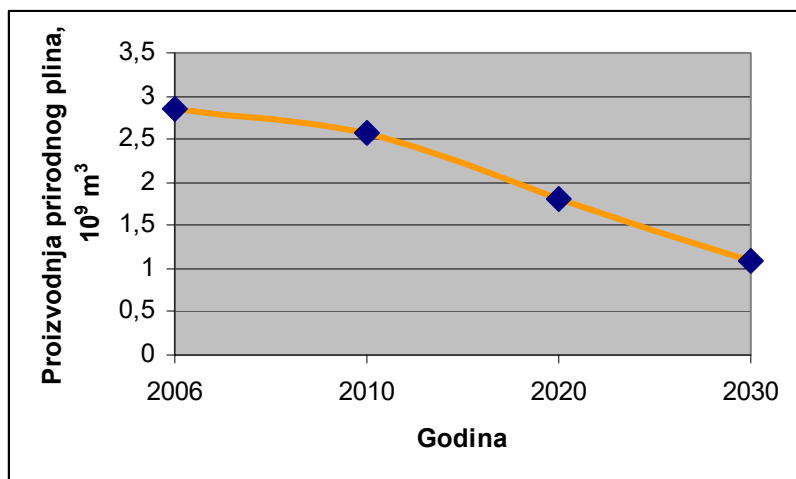
## 2.2.2. Prirodni plin u Hrvatskoj

Prirodni plin u Republici Hrvatskoj u ukupnoj potrošnji energije sudjeluje s 25%. Iako potrošnja prirodnog plina u proteklih dvadeset godina bilježi konstantan porast, Republika Hrvatska je po potrošnji prirodnog plina još uvijek za oko 34% ispod prosjeka potrošnje u EU [5]. Prema održivom scenariju neposredne potrošnje energije, predviđa se porast potrošnje prirodnog plina u neposrednoj potrošnji po stopi od 4,2% godišnje do 2020. godine. Projekcija ukupne potrošnje prirodnog plina u Republici Hrvatskoj prikazana je u na *slici 2-1*.



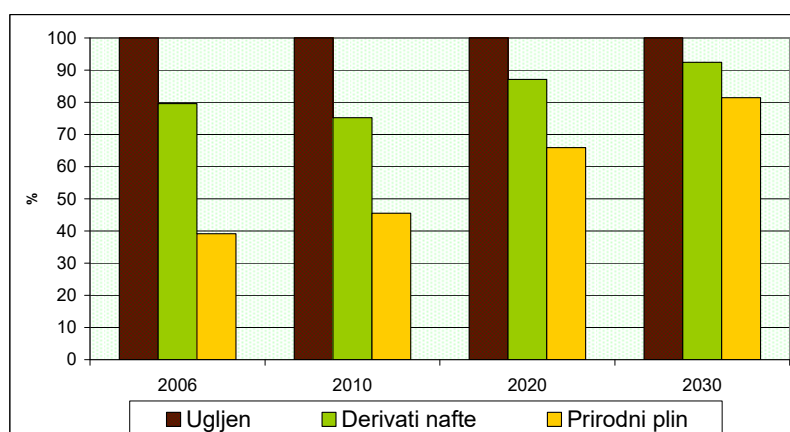
*Slika 2-1: Projekcija potrošnje plina u Republici Hrvatskoj [5]*

U Republici Hrvatskoj prirodni plin se proizvodi na 25 plinskih polja iz 101 plinske bušotine, čime se trenutno podmiruje oko 60 % domaćih potreba za prirodnim plinom. Najznačajnija proizvodnja prirodnog plina je na eksploatacijskim poljima Molve, Kalinovac i Stari Gradac u sklopu koji su izgrađena i postrojenja za preradu i pripremu plina za transport Centralne plinske stanice Molve I, II i III, te iz Sjevernog Jadrana. S obzirom na preostale rezerve, uz očekivani godišnji prirodni pad proizvodnje od 3 do 7%, predviđa se da će ekonomična proizvodnja prirodnog plina iz bušotina duboke Podravine trajati još oko 25 godina [5]. *Slika 2-2* prikazuje procjenu buduće proizvodnje prirodnog plina u Republici Hrvatskoj u razdoblju do 2030. godine.



Slika 2-2: Procjena domaće proizvodnje prirodnog plina u razdoblju do 2030. godine [5]

Na temelju iznesenih procjena vidljivo je kako će nakon 2015. godine, a naročito nakon 2020. godine, proizvodnja prirodnog plina padati, a uvoz intenzivno rasti. Iz sve veće uvozne zavisnosti proizlazi i porast osjetljivosti energetskeg sektora i time cjelokupnog gospodarstva Republike Hrvatske o svim zbivanjima, pa i mogućim poremećajima, na međunarodnim tržištima energije. Posebna osjetljivost izražena je u odnosu na međunarodno tržište nafte i potom međunarodno tržište prirodnog plina. Izloženost gospodarstva Republike Hrvatske oscilacijama međunarodnih energetskeg tržišta s obzirom na uvoz prirodnog plina će rasti jer će se, prema predviđanjima, uvozom prirodnog plina 2015. godine zadovoljavati 50 % domaćih potreba za prirodnim plinom, a nakon 2020. godine 65 % domaćih potreba (slika 2-3) [5].



Slika 2-3: Ovisnost RH o uvozu energije [5]

Kao što je vidljivo iz ranije navedenog, a i sa slike 2-3, predviđa se da će potrošnja prirodnog plina u Republici Hrvatskoj sve više rasti posljedica čega će biti i povećanje uvoza

prirodnog plina. Kako bi se osigurale dostatne količine prirodnog plina za zadovoljavanje buduće potrošnje Republika Hrvatska će morati dugoročno osigurati nove dobavne pravce prirodnog plina [5]. Prema Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske navedena je obavezna primjena Kyotskog protokola uz Okvirnu konvenciju UN o promjeni klime u kojem su naznačena svojstva održivog razvoja i Međunarodne obveze glede stakleničkih plinova [6].

### 2.3. Karakteristike prirodnog plina

Na temelju *Zakona o tržištu plina* (NN 28/13) donesen je *Pravilnik o općim uvjetima opskrbe plinom* (NN 158/13) koji definira standardnu kvalitetu prirodnog plina (*tablica 2-2*).

Tablica 2-2: Standardna kvaliteta prirodnog plina [7]

Svojstvo	Zahtjev
<b>Kemijski sastav, mol %</b>	
Metan (CH <sub>4</sub> )	Minimalno 85
Etan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Maksimalno 7
Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) i viši ugljikovodici	Maksimalno 6
Dušik (N <sub>2</sub> )	Maksimalno 3
Ugljični dioksid (CO <sub>2</sub> )	Maksimalno 2,5
Kisik (O <sub>2</sub> )	Maksimalno 0,001
<b>Sadržaj sumpora, mg/m<sup>3</sup></b>	
Sumpor ukupni (S)	Maksimalno 30
Sumporovodik i karbonil sulfid ukupno (H <sub>2</sub> S+COS)	Maksimalno 5
Merkaptani (RSH)	Maksimalno 6
<b>Gornja ogrjevna vrijednost HG, kWh/m<sup>3</sup></b>	Minimalno 10,28
	Maksimalno 12,75
<b>Donja ogrjevna vrijednost Hd, kWh/m<sup>3</sup></b>	Minimalno 9,25
	Maksimalno 11,47
<b>Gornji Wobbe – indeks Wg, kWh/m<sup>3</sup></b>	Minimalno 12,75
	Maksimalno 15,81
<b>Donji Wobbe – indeks Wd, kWh/m<sup>3</sup></b>	Minimalno 11,48
	Maksimalno 14,23
<b>Relativna gustoća, d</b>	Minimalno 0,56
	Maksimalno 0,70
<b>Točka rosišta, °C pri tlaku od 70 bar</b>	
Vode	-8
Ugljikovodika	-2
<b>Plin neodoriziran (osim plina u distribucijskom sustavu), bez mehaničkih primjesa, smola ili spojeva koji tvore smolu</b>	

## 2.4. Zakonska regulativa onečišćenja

*Uredbom o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora* (NN 117/12) se, između ostalog, definiraju kriteriji količine otpadnih plinova [8]. Uredba sadrži definicije i pojmove:

- *GVE u otpadnom plinu* je najveće dopušteno ispuštanje onečišćujuće tvari sadržane u otpadnom plinu iz ispusta nepokretnog izvora koja ne smije biti prekoračena tijekom uobičajenog rada. Izražava se kao masa onečišćujuće tvari (masena koncentracija) u odnosu na količinu suhih otpadnih plinova koja se nalazi u  $1 \text{ m}^3$  pri normalnom stanju: temperaturi 273,15 K i tlaku 101,3 kPa, što odgovara jedinici količine od jednog normnog kubnog metra,  $1 \text{ mn}^3$ , a vezana je uz određeni volumni sadržaj (%-tni udio) kisika u suhom otpadnom plinu, iskazan kao standardni kisik, čime se uzimaju u obzir uvjeti izgaranja
- *masena koncentracija onečišćujuće tvari* u otpadnom plinu je masa onečišćujuće tvari po jedinici volumena ispuštenog otpadnog plina svedena na isto stanje otpadnog plina na koje je definirana i GVE bez obzira na koje se stanje otpadnog plina odnosi izvorno izmjerena koncentracija
- *otpadni plin* je plin koji sadrži onečišćujuće tvari, u krutom, tekućem ili plinovitom stanju ispušten iz ispusta ili iz opreme za smanjivanje emisije u zrak
- *plinska goriva* su goriva koja su pri temperaturi 273,15 K i tlaku 101,3 kPa u plinovitom agregatnom stanju
- *postrojenje* je nepokretna tehnička jedinica u kojoj se obavlja jedna ili više aktivnosti određenih posebnim propisom te bilo koja druga aktivnosti neposredno tehnički povezana s aktivnostima koje se obavljaju na toj lokaciji, a koje bi mogle utjecati na emisije i onečišćenje
- *tehnoški proces* je skup postupaka kod kojih se iz određenih polaznih sirovina i aditiva dobiva jedan ili više sličnih proizvoda
- *točkasti izvor emisije* je izvor kod kojeg se onečišćujuće tvari oslobađaju u zrak iz jednog ispusta (dimnjak, cijevni ispust, itd.) ili iz nekoliko ispusta povezanih na zajednički ispust
- *toplinski gubitak* otpadnog plina je postotni udio toplinske snage ložišta koji se kao osjetna toplina gubi ispuštanjem otpadnih plinova u zrak.

Granične vrijednosti emisija (GVE) za anorganske tvari u obliku pare ili plina u otpadnom plinu, razvrstanih u razrede štetnosti od I. do IV., su:

*I. razred štetnosti*

- arsin, klorovcijanid (klorcian), fosgen, fosforovhidrid (fosfin) pri masenom protoku od 2,5 g/h ili više - 0,5 mg/m<sup>3</sup>

*II. razred štetnosti*

- brom i njegovi plinoviti spojevi, izraženi kao HBr, klor, cianovodik, fluor i njegovi plinoviti spojevi, izraženi kao HF, vodikov sulfid pri masenom protoku od 15 g/h ili više - 3 mg/m<sup>3</sup>

*III. razred štetnosti*

- amonijak, anorganski spojevi klora koji nisu uključeni u I. i II. razred štetnosti, izraženi kao HCl, pri masenom protoku od 150 g/h ili više - 30 mg/m<sup>3</sup>

*IV. razred štetnosti*

- oksidi sumpora: sumporov (IV) oksid i sumporov (VI) oksid, izraženi kao sumporov dioksid (SO<sub>2</sub>), oksidi dušika: dušikov (II) oksid i dušikov (IV) oksid, izraženi kao dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>), pri masenom protoku od 1800 g/h ili više - 350 mg/m<sup>3</sup>.

GVE praškastih tvari su 50 mg/m<sup>3</sup> kod tehnološkog procesa pripremanja bitumeniziranih materijala za izgradnju putova (asfaltne baze) uz zadani volumni udio kisika 17% [8]. Učestalost mjerenja količina štetnosti dana je člankom 8 i 9 iste Uredbe. Način mjerenja i prihvaćene norme mjerenja odnosno ispitivanja dana su *Pravilnikom o praćenju emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora* (NN 129/12) [9].

## **2.5. Gospodarenje energijom u industrijskim procesima**

Održivi razvoj je okvir za oblikovanje politika i strategija kontinuiranog gospodarskog i socijalnog napretka, bez štete za okoliš i prirodne izvore bitne za ljudske djelatnosti u budućnosti. Oslanja se na ideju prema kojoj razvoj ne smije ugrožavati budućnost dolazećih naraštaja trošenjem neobnovljivih izvora i dugoročnim devastiranjem i zagađivanjem okoliša. Riječ je o modelu održivosti koji stavlja naglasak na vođenje razvojne politike uz maksimalnu primjenu znanstvenih dostignuća i novih tehnologija u cilju zaštite prirode i očuvanja okoliša [10]. Održivi razvoj predviđa bolju kakvoću života u sadašnjosti i budućnosti uz savjesno korištenje prirodnim izvorima. Takav pristup temelji se na povezanosti područja energije, ekonomije, ekologije, edukacije i etike.

Budući da je energija osnova svakog razvijenog društva, temeljni ciljevi energetike obuhvaćaju niz područja kao što su zadovoljavanje potreba energijom te sigurnost opskrbe potrošača. Nužno je uskladiti razvoj energetike i ostalog gospodarstva uz racionalnu potrošnju i minimalne troškove. U svrhu povećanja ekološke sigurnosti mora se provesti analiza mogućnosti primjene alternativnih obnovljivih i neobnovljivih izvora. Za razvoj energetike potrebna je edukacija na svim razinama. Sveobuhvatnost ovakvog pristupa zahtijeva i vrednovanje različitih gledišta ljudi u odnosu na prave i istinske vrijednosti što je osnovna komponenta etike. Kod gospodarenja energijom uobičajeni su sljedeći koraci:

- a) određivanje potrošnje
- b) pojave gubitaka
- c) primjena akcija za očuvanje energije.

Kontinuirano praćenje svakog industrijskog procesa s energetskegledišta temelji se na procesnim podacima. To rezultira uvidom u postojeće stanje, a isto tako upućuje i na mogućnost pronalazanja poboljšanja procesa. Na temelju energetske bilance utvrđuju se mogućnosti očuvanja. Ovakvim pristupom upućuje se na mogućnost postizanja ušteda koje rezultiraju povišenjem učinkovitosti. Prednost poboljšanja očituje se na području energetske sigurnosti, zaštite okoliša i povećanja ekonomičnosti. S područja ekonomičnosti akcije gospodarenja energijom radi očuvanja, odnosno sniženja specifične potrošnje energije po jedinici proizvoda mogu se promatrati u dvije razine i to [2]:

- a) bez neznatnih ulaganja ili s neznatnim ulaganjima što uključuje proračun i kontrolu uz promjenu navika potrošača čime se može ostvariti ušteda do 15%
- b) sa znatnim investicijskim troškovima uz uključivanje modifikacija u procesu te zamjene opreme čime se štedi do 30%, s kompletnom rekonstrukcijom proizvodnje primjenom novih tehnologija i uštedom do 50%.

## **2.6. Očuvanje energije u procesnoj industriji**

Prvi zakon termodinamike temeljen je na principu zakona o održavanju i pretvorbi energije. To znači da su energija i masa sačuvane te se ne mogu stvoriti ili izgubiti, nego samo prelaziti iz jednog oblika ili sustava u drugi. Očuvanje energije znači poboljšanje energetske učinkovitosti procesa što je povezano s minimalnom potrošnjom izvora, kao i minimalnim utjecajem na okoliš. Međutim prvi glavni zakon ne uzima u obzir gubitke, zbog čega se za



energetske analize, tj. procjenu mogućnosti uštede mora primijeniti i drugi glavni zakon termodinamike.

Industrija je najveći potrošač energije pri čemu se gotovo polovina potrošnje ostvaruje u energetske intenzivnim procesima proizvodnje (npr. kemijska, papirna, cementna). Međutim, upravo u industriji postoje znatni potencijali i mogućnosti za povišenje energetske učinkovitosti (npr. upotreba otpadnih toplina kao sekundarnih izvora). U industriji se energija može sačuvati na tri načina:

- a) prvi način je gospodarstvena faza koja uključuje minimalnu cijenu i rizik, a rezultira očuvanjem energije od 3 – 7% po jedinici proizvoda (specifična potrošnja energije).
- b) drugi način obuhvaća rekonstrukciju postojećeg procesa i tehnologije uz dodatno očuvanje od 5 – 10% s relativno malim rizikom i velikim investicijskih troškovima.
- c) treći način ostvaruje se znatnim promjenama postojećeg procesa što rezultira najvećim poboljšanjem s gledišta potrošnje energije. Ova je metoda popraćena visokim investicijskih troškovima i rizikom, međutim povišenje energetske učinkovitosti kreće se u rasponu od 25 – 65% ovisno o industrijskom procesu [2].

Na potrošnju energije utječu mnogi faktori od proizvodnje do raspodjele pa industrijska energetika mora biti stručno vođena i upravljana. Akcije očuvanja tj. uštede energije provode se uz detaljno poznavanje industrijskog procesa, a obuhvaćaju sljedeće:

- a) Identifikaciju smanjenja potrošnje energije (npr. električne, toplinske) i energenata (npr. gorivo, voda). To uključuje utvrđivanje vrste i količine energije i energenata, tok energije u proizvodnji, usporedbu dobave te stvarne i projektirane potrošnje, mjerenje procesnih parametara, te sastav, količinu i temperaturu otpadnih toplina.
- b) Ispitivanje i dokazivanje stupnja iskorištenja pojedinih uređaja, postrojenja i tehnoloških operacija, na što utječe tehnologija i organizacija industrijske proizvodnje.
- c) Utvrđivanje mogućnosti modernizacije procesa i uvođenje dodatnih uređaja za postizanje maksimalne ekonomičnosti [2].

Pravilno gospodarenje energijom temelji se na utvrđivanju postojećeg stanja te bilanci i proračunima proizvodnje, dobave, raspodjele, potrošnje i gubitaka energije. Za zadovoljavajuće upravljanje procesnom energetikom i provođenje racionalizacije potrebno je mjerenje potrošnje koje obuhvaća sljedeće: električnu energiju, paru, plin, komprimirani zrak, vodu (posebice rashladnu), količinu kondenzata pare, otpadnih tekućina, ispušnih plinova i svih medija koji sadržavaju energiju u proizvodnom procesu i postrojenju. Na potrošnju i gubitke najčešće utječu ovi faktori:

- a) energetski parametri – tlak pare i komprimiranog zraka, temperatura i vlažnost zraka u prostorijama, temperatura radnog medija za tehnološke procese, napon, itd.
- b) način rada – tehnologija proizvodnje, smjene, stupanj iskorištenosti proizvodnih kapaciteta
- c) stanje energetskih instalacija i opreme – gubici topline zbog loše izolacije, propuštanje radnih medija, loš stupanj iskorištenja, zastarjelost i dotrajalost opreme.

Oko 50% energije u industriji gubi se u otpadnim toplinama pa je potrebno utvrditi mjesta gubitaka i mogućnosti njihova smanjenja. Mjere za pravilno vođenje procesa mogu se podijeliti na:

- a) organizacijske: disciplina potrošnje, program rada, urednost u rukovanju opremom, motiviranje za štednju,
- b) opće tehničke: mjerenja relevantnih parametara, primjena tehničkih propisa, automatizacija, održavanje opreme i instalacija,
- c) tehnološke: optimiranje radnih operacija s energetskog gledišta, suvremena oprema i tehnologije [2].

### 2.6.1. Mjere u energetici

Osnovni pojmovi u problematici gospodarenja energijom su *štednja*, *racionalna potrošnja* i *restrikcija* ili *redukcija* [2].

*Štednja* podrazumijeva razumno trošenje energije i energenata, bez posljedica na proizvodnju kao i na ljude. Tako se na primjer rasvjeta prostorija mora odvijati prema važećim propisima jer smanjeni intenzitet rasvjetljenja prostorija dovodi do oštećenja vida. Također i zagrijavanje prostorije se mora odvijati prema propisima jer previsoke temperature znače 5 do 6% veću potrošnju goriva. U suprotnom sa sniženjem temperature može doći do oboljenja odnosno prehlada kod ljudi.

*Racionalna potrošnja* obuhvaća mjere i postupke za trošenje energije u stvarnim potrebnim količinama uz neometanu proizvodnju i zadovoljavajuću kakvoću konačnog proizvoda. To je optimalizacija procesa koja obuhvaća sniženje ukupne i specifične potrošnje energije po jedinici proizvoda te optimiranje opreme i procesa. Karakteristični pokazatelji racionalne potrošnje energije su:

- a) specifična potrošnja izražena kao omjer utrošene energije (kWh) i količine proizvoda (kg, broj proizvoda, tona, itd.),

- b) specifična cijena energije izražena kao omjer ukupnih troškova dobave energije (novčana jedinica) i dobavljene energije (kWh),
- c) specifični dohodak energije kao omjer dohotka u promatranom razdoblju (novčana jedinica) i utrošene energije u tom razdoblju (kWh).

*Restrikcija ili redukcija* znači ograničenje potrošnje energije nasilnim mjerama, što je uzorkovano specifičnim razlozima, npr. nestašicom goriva.

## 2.6.2. Pregled najčešćih gubitaka

Porast potrošnje energije uzrokovan je nizom čimbenika od kojih su najčešći oni koji su uzorkovani gubicima:

1. Industrijskih procesa koji mogu obuhvaćati sljedeće gubitke:
  - a) prerano uključivanje potrošača u pogon,
  - b) previsoke procesne parametre,
  - c) nezadovoljavajuće iskorištenje kapaciteta uređaja,
  - d) nisko opterećenje u odnosu na nazivnu snagu,
  - e) diskontinuirano vođenje procesa,
  - f) prazni hod
  - g) prevelik kapacitet.
2. Gubici energetske mreže obuhvaćaju najčešće propuštanje različitih energetskih radnih medija: hladne i tople vode, pare, loživog ulja, zemnog plina i komprimiranog zraka
3. Gubici u opreme uključuju nedovoljnu toplinsku izolaciju, velike otpore strujanja u cjevovodima, preopterećene kablove i pojavu prevelikom mehaničkog opterećenja.
4. Loše vođeni pogon, odnosno nepridržavanje projektiranih propisa.
5. Gubici otpadnih toplina osobito su prisutni u industrijskim procesima što iziskuje provođenje mjera za očuvanje energije. Relativni parametri koji moraju biti poznati radi optimizacije su temperaturna razina, protok, kemijski sastav i minimalno dopuštena temperatura otpadne topline. Pri izboru uređaja za povrat otpadne topline potrebno je utvrditi temperaturu, kemijski sastav, maksimalno dopuštenu temperaturu medija koji se zagrijava. Najčešći izmjenjivači za upotrebu otpadnih toplina su regeneratori, rekuperatori, predgrijači vode te predgrijači zraka [2].

Izvori otpadne energije mogu se podijeliti u skladu s temperaturnom razinom u tri grupe:

- a) visokotemperaturni iznad  $650^{\circ}\text{C}$ ,
- b) srednjetemperaturni između  $230^{\circ}\text{C}$  i  $650^{\circ}\text{C}$  te,
- c) niskotemperaturni ispod  $230^{\circ}\text{C}$  [8].

## 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

### 3.1. Dosadašnja istraživanja mogućnosti uštede energije u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina

Strogi ekološki zahtjevi te težnja za ostvarivanjem značajnih ušteda energenata u proizvodnim procesima potakli su analizu proizvodnog procesa asfaltnih mješavina u stacionarnim asfaltnim bazama [11]. Energenti, poput fosilnih goriva i električne energije, koriste se na asfaltnim bazama za zagrijavanje bitumena, sušenje i zagrijavanje kamenog materijala, za rad ventilatora za otprašivanje, za pogon postrojenja te rad upravljačke sobe. Mogućnost smanjenja troškova proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina te povećanje efikasnosti asfaltnih postrojenja istraživalo je više autora. Istraživanja su se provodila u više različitih smjerova: istraživanja mogućnosti snižavanja vlažnosti agregata, poboljšanja tehnološkog procesa proizvodnje asfaltnih mješavina primjenom modela „*just-in-time*“ i snižavanja temperature asfaltnih mješavina. Proizvođači asfaltnih postrojenja su moguća rješenja jednostavnijeg i ekonomičnijeg sušenja kamenog agregata tražili u povećanjima dimenzija bubnja za sušenje, izvedbom većih plamenika te razvojem kompleksnih rješenja izgaranja.

Tijekom proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina dolazi do znatnog utroška toplinske energije kao i nepovoljnog djelovanja na okoliš. Prema izvorima [12] i [13] potrošnja energije u procesu sušenja i zagrijavanja mineralne mješavine je u rasponu 70–100 kWh (85 kWh) po proizvedenoj toni i 5–8 kWh u transportu i skladištenju asfaltne mješavine pri čemu se oslobodi 22 kg CO<sub>2</sub>. Činitelji koji utječu na potrošnju energenata u proizvodnji asfaltnih mješavina su diskontinuirana proizvodnja, iskoristivost proizvodnog kapaciteta postrojenja, izloženost vremenskim uvjetima i sastav deponirane mineralne mješavine, proizvodnja asfaltnih mješavina u vremenski nepovoljnim razdobljima (razdoblje nižih temperatura zraka i većih količina padalina), kvaliteta korištenih energenata i tehnološke mogućnosti postrojenja [13]. Brojna istraživanja provedena su u svrhu dobivanja spoznaja o tome koliko je potrebno uložiti energije za sušenje kamenog materijala pri proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina.

Autori Jullien i drugi [14] ukazali su da se i do 97% energije asfaltnog postrojenja u radu koristi samo za zagrijavanje i sušenje agregata. Young [15] ističe kako današnji režim rada postojećih asfaltnih postrojenja podrazumijeva nedostatnu iskoristivost proizvodnih kapaciteta, znatan utrošak energenata uzrokovan nestalnom proizvodnjom asfaltnih mješavina i

korištenjem kamenih frakcija svakodnevno izloženih vremenskim utjecajima. Proces proizvodnje asfaltnih mješavina na asfaltnim postrojenjima odvija se pretežito kroz veći dio godine, i u vremenski nepovoljnim razdobljima te kako diskontinuirana proizvodnja dovodi do veće potrošnje pogonskog goriva za 20–35%. Takav rad uzrokuje nedostatnu iskoristivost radnih resursa, povećanu potrošnju energije na zagrijavanje hladne i vlažne mineralne mješavine, grijanje i održavanje potrebne radne temperature uskladištenoga bitumena [15].

Autori Grabowski i Janowski [16] navode kako je za sušenje 1 t mineralne mješavine sa udjelom vlage od 6% potrebno 4 l goriva (lož ulje), dok su za zagrijavanje suhe mješavine na 150°C potrebno dodatne 3 litre goriva.

Ang i drugi [17] u istraživanju provedenom tijekom proizvodnje i u laboratoriju dokazali su kako vlažnost agregata ima presudan utjecaj na potrošnju energije u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina. Također, slično ostalim autorima, navode kako potrošnja energije varira u zavisnosti od dijela godine u kojoj se asfaltnih mješavine proizvode. Napominju da utjecaj količine proizvodnje i atmosferski uvjeti utječu na utrošak energije. Prema istim istraživanjima ukazano je da smanjenje vlažnosti u mineralnoj mješavini od 3% rezultira uštedom u utrošku energije u iznosu od 55–60%.

Jenny [18] ukazuje kako smanjenje vlage za 2% u mineralnoj mješavini rezultira uštedom u utrošku goriva u iznosu 1,5 kg/t asfaltne mješavine te ističe kako je uz smanjenje vlažnosti te veću primjenu niskotemperaturnog asfalta i recikliranog asfalta moguće smanjiti i emisiju CO<sub>2</sub> čak za 25%. S obzirom da se u Australiji godišnje proizvede 8 milijuna tona asfalta za izgradnju kolnika, isti autor ističe kako je asfaltna industrija jedna od malobrojnih industrija gdje je moguće postići značajne uštede u proizvodnji i smanjiti štetan učinak na okoliš. Usporedbe radi, u Republici Hrvatskoj je tijekom 2017. godine na svim asfaltnim bazama proizvedeno i ugrađeno ukupno 2,16 milijuna tona asfaltnih mješavina [19].

O održivosti, emisiji ugljičnog dioksida i povezanošću s energijom i proizvodnjom asfaltnih mješavina, izvijestio je Muench [20] prema kojem ukupna količina ugljičnog dioksida ispuštenog tijekom izgradnje kolničke konstrukcije iznosi između 200 i 600 mg/milji ceste. Ukupne emisije CO<sub>2</sub> tijekom izgradnje kolnika variraju ovisno o dionici kolnika, aktivnostima građenja ili održavanja. Također zaključuje kako proizvodnja materijala (prvenstveno asfalta) doprinosi 60% do 80% potrošnje energije i 60% do 90% emisija CO<sub>2</sub> te da se navedeni udjeli mogu smanjiti poboljšanjem u proizvodnji materijala (asfalta).

Peinado i drugi [21] analizirali su utrošak energije te identificirali i procijenili termodinamičke gubitke u rotacijskom bubnju tijekom proizvodnje vruće asfaltne mješavine.

Provedena je parametarska analiza za asfaltno postrojenje prema različitim parametrima proizvodnje, uključujući različite vlažnosti sadržaja agregata i punila, različite radne temperature i uvjete okoline, a kako bi se utvrdili činitelji koji utječu na rad postrojenja. Rezultati su pokazali kako vlažnost agregata ima velik utjecaj na utrošak energije te da potrebna toplinska energija za podizanje temperature asfaltne mješavine za 10°C iznosi oko 2,62 kWh, a potreba za uklanjanjem 1% vlage iziskuje dodatnu potrebu za energijom u iznosu od 8,21 kWh.

Sivilevicius [22] u svom radu navodi da utrošak energije u proizvodnji vrućih asfaltnih mješavina ne zavisi samo o projektiranoj temperaturi asfaltne mješavine, udjelu vlage, temperaturi mineralne mješavine, kvaliteti goriva, radnjama operatora već i o dizajnu plamenika, bubnja za sušenje i sistema za skladištenje bitumena.

U istraživanju provedenom na asfaltnim bazama u Hrvatskoj (Androjić, 2013) [23] utvrđeno je kako se uklanjanjem 1% udjela vlage u mineralnoj mješavini, ostvaruju uštede u zagrijavanju materijala od 15,11% i 4,72%, ovisno o ulaznoj temperaturi mineralne mješavine, a time i smanjuje potreba za njezinim zagrijavanjem. Zaključeno je kako proizvodnja asfaltnih mješavina u različitim vremenskim razdobljima dovodi do varijabilnog utroška energije. Najniži utrošak energije ostvaruje se u razdobljima visokih temperatura zraka i malih količina padalina, u pravilu razdoblje u kojem je potreba za zagrijavanjem mineralne mješavine na projektiranu temperaturu najniža. Nakon provedenog višemjesečnog praćenja prethodno određenih utjecajnih činitelja na utrošak energije tijekom proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina, dobiveni rezultati su analizirani i na temelju njih osmišljen je i izrađen matematički model. Matematičkim modelom, koji je uključio interakciju utjecajnih parametara (udio vlage i temperature mineralne mješavine te utroška energije), moguće je provesti proračun i iskaz utroška energije uslijed varijabilne temperature i vlage mineralne mješavine pri proizvodnji vruće asfaltne mješavine. Također, u radu je zaključeno kako su sitnije frakcije kamenoga agregata za proizvodnju asfaltne mješavine (0/2, 0/4 mm) znatno sklonije zadržavanju vlage u svom sastavu te je uslijed toga potrebno mnogo više uložene energije za njihovo sušenje u samom ciklusu proizvodnje. Uslijed korištenja sitnijih frakcija kamenoga agregata s povećanom vlažnosti dolazi i do smanjenja radnoga kapaciteta.

Autori Androjić i Dolaček-Alduk [24] istraživali su različite činitelje koji utječu na potrošnju energije u rotacijskom bubnju. Analizirani su sljedeći činitelji: vlažnost mineralne mješavine, kašnjenje u dnevnoj proizvodnji, satni kapacitet proizvodnje i temperatura proizvedene vruće asfaltne mješavine. Ispitivanjem je obuhvaćena proizvodnja 88.079 t vruće

asfaltne mješavine kontinuiranog i diskontinuiranog sastava na cikličkoj asfaltnoj bazi u Republici Hrvatskoj. Tijekom 2014. godine promatrano je 182 proizvodnje mješavina, dok je sadržaj vlage ispitan na istom broju ulaznih uzoraka mineralnih mješavina. Kašnjenja u radu i proizvodni kapaciteti po satu mjereni su tijekom proizvodnje bilježenjem trajanja radnog vremena i kašnjenja. Konačni rezultat ovog istraživanja je stvaranje regresijskog modela korelacije između potrošnje energije i temperature asfaltne mješavine te satnog kapaciteta i vlage u mineralnom agregatu.

Iskustva ukazuju i da se pravilnom izvedbom natkrivenih i zaštićenih deponija kamenog materijala mogu ostvariti značajne uštede energenata potrebnih za sušenje i predgrijavanje kamenog materijala [25]. Naime, ukoliko podloga deponija kamenih frakcija nije uređena (betonirana i izvedena s odgovarajućim uzdužnim/poprečnim nagibom) ili natkrivena, uslijed velikih količina padalina dolazi do smanjenoga kapaciteta rada asfaltnoga postrojenja. Potrebno je produžiti vrijeme sušenja zbog povećanje količine vode u udjelu kamenoga agregata, pri čemu frakcije kamenoga agregata granulacije 0/2 i 0/4 mm znatno duže zadržavaju vodu u svom sastavu, imaju manju tendenciju procjeđivanja vode u odnosu na frakcije krupnijega granulometrijskog sastava.

Prema autoru Grabovski [26] vlažnost agregata na asfaltnom postrojenju u funkciji je veličine zrna, načina zaštite deponije, topografije terena i vremenskih uvjeta. Autor je zaključio da je sitnozrnati agregat zahtijevao pokrivenu deponiju te da je odnos vlažnosti agregata deponiranog bez ikakvog krova (nadstrešnice) obrnuto je proporcionalan promjeru zrna.

U radu autora Cimbola i drugi [27] analizirana je trenutna situacija u hrvatskim asfaltnim postrojenjima te je utvrđeno kako segmenti konverzije i korištenja energije još uvijek ne koriste tehničke i tehnološke inovacije na terenu. Vlaga agregata i nedostatak reguliranih i pokrivenih odlagališta koja se izvode u minimalnom nagibu, problem je u gotovo svim asfaltnim postrojenjima u Hrvatskoj.

Provedena su istraživanja mogućeg predgrijavanja kamenog agregata, a čime bi bilo moguće smanjiti troškove i vrijeme zagrijavanja i sušenja u rotacijskom bubnju. Predgrijavanje agregata u posebnim spremnicima akumulacijom toplinske energije sunčevog zračenja, istraživali su autori Androjić i drugi [28] i Androjić i drugi [29]. Modeli solarnih spremnika konstruirani su s primarnim ciljem postizanja što veće akumulacije toplinske energije dobivene sunčevim zračenjem tijekom razdoblja izlaganja agregata. Modeli spremnika jednakog volumena, izrađeni su s promjenjivom debljinom toplinske izolacije na stjenkama od 2, 5 i 10 cm, te staklenom stropnom površinom koja omogućuje dopiranje sunčevog zračenja u



unutrašnjost spremnika. U razdoblju od svibnja do studenog 2015. godine provedeno je mjerenje temperature mineralne mješavine deponirane u solarnim modelima i mješavina izloženih vanjskim uvjetima okoliša. Dobiveni rezultati upućuju na činjenicu da tijekom vremena dolazi do akumuliranja topline mineralne mješavine, odnosno predgrijavanja, a što rezultira uštedom energije prilikom zagrijavanja i sušenja mineralne mješavine u rotacijskom bubnju.

O istraživanju upotrebe potencijala otpadnih plinova koji se ispuštaju u atmosferu na kraju proizvodnog procesa u asfaltnim bazama, na smanjivanje vlažnosti agregata izvijestili su autori Cimbola i Dolaček-Alduk [30]. Korištenjem otpadnih plinova iz dimovoda te njihovim preusmjeravanjem i ponovnom upotrebom, smanjio bi se trošak potrošnje energije kod proizvodnje asfaltnih mješavina, a time i količina ispuštenog CO<sub>2</sub> u atmosferu. Temperatura ispušnih plinova kreće se od 105-220°C kod proizvodnje standardne vruće asfaltne mješavine dok kod proizvodnje mješavine sa recikliranim asfaltom temperatura ispušnih plinova može dosegnuti i 250°C. Temperatura ovisi i o izvedbi asfaltnog postrojenja te dužini puta koji plin prolazi prije ispuštanja u okoliš te su najviše vrijednosti temperatura upravo na spoju izlaznog kanala s rotacijskim bubnjem. U radu je istaknuta ideja o trakastoj sušari u kojoj bi kameni materijal prilikom kretanja beskonačnom trakom u određenom vremenu izgubio dio vlažnosti.

Grabowski i drugi [26] istraživali su koliko organizacija tehnološkog procesa i elementi automatske kontrole mogu imati utjecaja na smanjenje gubitka energije tijekom procesa proizvodnje asfaltnih mješavina. Rezultati su pokazali čak i da količina deponiranog agregata ima utjecaja na troškove proizvodnog procesa. Tijekom dugotrajnih i intenzivnih oborina, ukoliko je na deponiji mala količina agregata samo će ta količina biti vlažna i energija će se utrošiti za sušenje manje količine agregata (a ne ukupno potrebne količine). Isporuka agregata frakcija 0/2 i 0/4 mm (frakcije koje upijaju više vode od krupnijih frakcija) bila je pažljivo isplanirana, neposredno pred početak proizvodnje asfaltnih mješavina, kako ne bi došlo do dodatnog vlaženja frakcija uslijed oborina i te su frakcije bile deponirane ispod nadstrešnica. Krupnije frakcije agregata su također bile isporučene neposredno pred početak proizvodnje, one su bile deponirane na otvorenoj deponiji. Opisane organizacijske promjene omogućile su uštedu u potrošnji energije pri proizvodnji asfaltnih mješavina čak za 50%

### **3.2. Dosadašnja istraživanja mogućnosti uštede energije proizvodnjom toplih asfaltnih mješavina**

Povećane cijene energenata i sve stroži ekološki zahtjevi vezani za količine ispušnih plinova i sadržaja ugljičnog dioksida, zahtijevaju pažljiviji pristup proizvodnji asfaltnih mješavina. Postavljeni zahtjevi mogu se ostvariti smanjenjem utrošene toplinske energije na zagrijavanje mineralne mješavine ili većom proizvodnjom asfaltnih mješavina nižih temperatura. Tople asfaltne mješavine (eng. *Warm Asphalt Mixes*) su mješavine koje se proizvode na temperaturama nižim od onih za vruće asfaltne mješavine, a čija se temperatura proizvodnje kreće od 100 do 140°C [31]. Gotovo više od dva desetljeća tople asfaltne mješavine predstavljaju glavni istraživački izazov za proizvodnju ekološki održivih asfaltnih kolnika. Proizvodnja toplih asfaltnih mješavina rezultira nizom prednosti: smanjenim utroškom energije potrebne za zagrijavanje, smanjenim emisijama CO<sub>2</sub> i prašinom, produžetkom građevinske sezone i lakšom ugradnjom asfaltnih slojeva tijekom hladnijih mjeseci i iskorištenjem recikliranog asfaltnog agregata u većem udjelu pri proizvodnji mješavina. Upravo zbog niza prednosti te činjenice kako se i s toplim asfaltnim mješavinama mogu dobiti jednako kvalitetni asfaltni slojevi poput onih izvedenih od vrućih asfaltnih mješavina, ove mješavine su predmet istraživanja brojnih europskih i svjetskih istraživača [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39]. Istraživanja na toplim asfaltnim mješavinama provode se u različitim smjerovima: od istraživanja mogućnosti uštede energije, količine emisija ispušnih plinova i količine CO<sub>2</sub>, poboljšanja tehnologija izvođenja, istraživanja različitih dodataka mješavinama do usporedbe svojstava i kvalitete toplih asfaltnih mješavina s vrućim mješavinama.

Jenny [18] navodi kako smanjenjem temperature miješanja prilikom proizvodnje asfaltne mješavine s 180 na 115°C dovodi do smanjenja utroška goriva za 1,5 kg po proizvedenoj toni asfaltne mješavine. Middleton [40] ukazuje kako je prilikom proizvodnje tople asfaltne mješavine moguće ostvariti uštede do 24,20% u odnosu na proizvodnju vruće asfaltne mješavine. Prema autoru Zaumanis [41], uštede uslijed proizvodnje tople asfaltne mješavine u odnosu na potrebnu uloženu energiju za proizvodnju vrućih asfaltnih mješavina iznosi od 5 do 18%.

Autori You i drugi [42] i Khandhal [43] ističu smanjenje potrošnje energije kao najvažniju prednost toplih asfaltnih mješavina te navode kako se uštede kreću u iznosima 20 do 30%. Prema istim autorima, primjena toplih asfaltnih mješavina smanjuje vidljive i nevidljive emisije u sličnom iznosu, do 30%, a što se direktno reflektira na kvalitetu zraka.

Rubio i drugi [44] uspoređivali su količinu ispušnih plinova i čestica tijekom proizvodnje toplih i vrućih asfaltnih mješavina u asfaltnom postrojenju te tijekom izvođenja i zbijanja slojeva od asfaltnih mješavina. Rezultati istraživanja pokazali su kako je proizvodnja i ugradnja toplih asfaltnih mješavina ekološki prihvatljivija zbog značajnog smanjenja udjela CO<sub>2</sub>, čak za 58% u odnosu na vruću asfaltnu mješavinu.

Autori Costa i Benta [45] smatraju da su tehnologije toplih asfaltnih mješavina daleko od punog potencijala, uglavnom zbog troškova aditiva. U studiji procjenjuju potencijalne ekonomske i ekološke prednosti primjene toplih asfaltnih mješavina. Rezultati potvrđuju kako su odgovarajuće tople asfaltne mješavine ekonomski povoljne te omogućuju značajno smanjenje potrošnje energije i posljedično smanjenje emisija CO<sub>2</sub>.

Usporedbom uvjeta zbijanja toplih i vrućih asfaltnih mješavina bavili su se autori Kamarudin i drugi [46]. Istraživali su vruće asfaltne mješavine i tople asfaltne mješavine, maksimalne veličine zrna agregata 14 mm. Dodatak u toploj asfaltnoj mješavini bio je na bazi ulja. Tijekom građenja mjerene su temperature i gustoća, a analizirane su brzina hlađenja i stupanj zbijenosti. Rezultati istraživanja pokazali su da topla asfaltna mješavina ima nižu stopu hlađenja, gdje se temperatura mješavine polako, ali i dalje smanjuje. Također, pokazano je da topla asfaltna mješavina ima veći stupanj zbijenosti.

Autori Romier i drugi [47] opisali su novu tehniku obavijanja agregata koja smanjuje potrošnju energije i emisije stakleničkih plinova. Originalnost procesa leži u najboljoj upotrebi promjene stanja bitumena: tekućine kada je vruća i sposobna se pretvoriti u pjenu ili emulgirati u kontaktu s vodom, a uključeno je i umjereno zagrijavanje samo sitnih čestica; ostatak skeleta agregata se koristi u hladnom i vlažnom stanju, što daje značajnu uštedu pri miješanju.

Tople asfaltne mješavine utječu i na uvjete rada te nude mogućnost produljenja građevinske sezone. Smanjenje temperature proizvodnje asfalta utječe na bolje radne uvjete zbog manje količine ispušnih plinova i prašine, a što je posebno važno na gradilištima poput tunela, gdje su uvjeti ventilacije lošiji. Ugradnjom toplih asfaltnih mješavina moguće je produljiti sezonu građevinskih radova jer u hladnijim mjesecima, dodaci tople asfaltne mješavine olakšavaju zbijanje mješavine, a sama mješavina se sporije hladi.

Uz sve poznate prednosti toplih asfaltnih mješavina, njihove kvalitete i prednosti kod izvođenja, autori Rubio i drugi [32] ističu kako je važno da tople asfaltne mješavine budu uključene i u nacionalne tehničke specifikacije kako bi asfaltna industrija bila potaknuta na proizvodnju, a izvođači na ugradnju većih količina toplih asfaltnih mješavina jer one još uvijek nisu dostigle svoj puni potencijal.

## 4. PROIZVODNJA ASFALTNIH MJEŠAVINA

### 4.1. Postupci proizvodnje asfaltnih mješavina

Klasične asfaltne mješavine su mješavine mineralnih tvari (kamene sitneži, pijeska i kamenog brašna) i bitumena kao veznog sredstva, a koji s obzirom na sastav mješavine, mogu zauzimati različiti količinski udio izražen maseno ili volumno [48].

Asfaltne mješavine mogu se podijeliti na više načina, ovisno sastavu mješavina, položaju ugrađenog sloja, načinu ugradnje, namjeni te prema temperaturi pripreme/proizvodnje i ugradnje. Prema temperaturi proizvodnje i ugradnje asfaltne mješavine dijele se na:

- asfaltne mješavine proizvedene po vrućem postupku (Hot Mix asphalt - HMA), proizvodnja kojih se odvija na temperaturama 135°C do 170°C,
- asfaltne mješavine proizvedene po toplom postupku (Warm mix asphalt – WMA), proizvodnja kojih se odvija na temperaturama 80°C do 135°C, te
- asfaltne mješavine proizvedene po hladnom postupku, pri temperaturi okoliša do 25°C.

Asfaltne mješavine proizvedene po vrućem postupku su kvalitetne mješavine, dominantne u proizvodnji asfaltnih mješavina i ugrađuju se u nosive, vezne i nosivo-habajuće slojeve kolničkih konstrukcija cesta svih skupina prometnih opterećenja. Optimalni udio komponenti u asfaltnoj mješavini je važan za proizvodnju kvalitetne i trajne mješavine te se sastav asfaltne mješavine pažljivo projektira.

Raspon temperature kod proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina ovisi o više činitelja, od kojih je najutjecajniji vrsta primijenjenog bitumena (cestograđevni bitumen, polimerom modificirani bitumen, tvrdi cestograđevni bitumen, razrijeđeni i omekšani bitumen). U *tablici 4-1* prikazane su temperature asfaltnih mješavine pri proizvodnji ovisno o upotrijebljenom tipu bitumena.

*Tablica 4-1: Temperature proizvodnje asfaltnih mješavina ovisno o tipu bitumena*

Vrsta bitumena	Raspon temperature, °C
Cestograđevni bitumen 35/50	165 - 185
Cestograđevni bitumen 50/70	160 - 180
Cestograđevni bitumen 70/100	150 - 170
Polimerom modificirani bitumen PmB 45/80-65	170 - 190

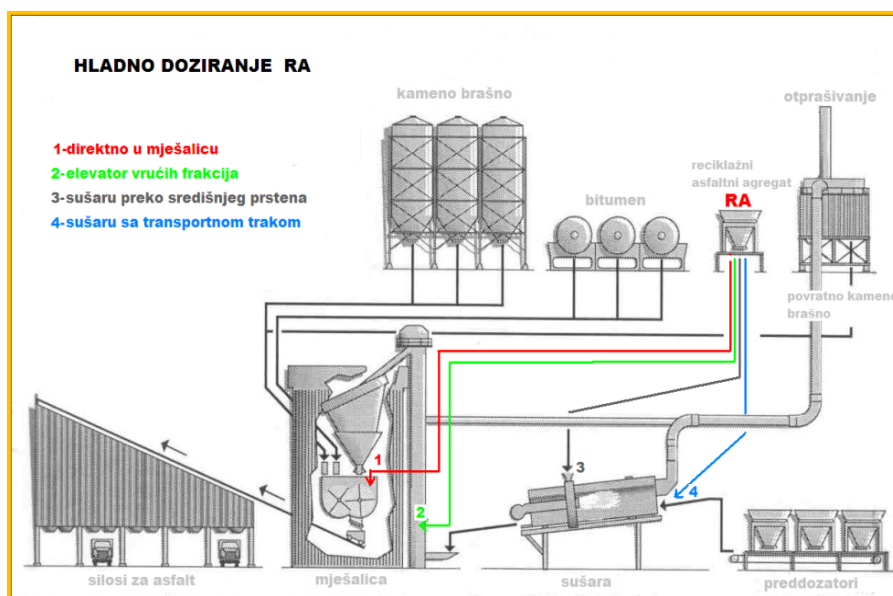
Kod vrućih asfaltnih mješavina temperatura je najvažniji parametar kojeg je potrebno redovito kontrolirati, pri proizvodnji asfaltne mješavine, njenom prijevozu do gradilišta i pri ugradnji. Utjecajem temperature na svojstva vrućih asfaltnih mješavina bavili su se brojni autori [49], [50], [51], [52], [53] i [54]. Svako nepotrebno povećanje temperatura sa sobom povlači nepotreban trošak energenata, ali i rizik da bitumen izgubi svoja tražena svojstva („pregori“) što se vrlo nepovoljno može odraziti na kvalitetu asfaltne mješavine. S druge strane, ukoliko je temperatura asfaltne mješavine niža od optimalne, javlja se problem prilikom ugradnje asfaltnog sloja. Ugradnja asfaltne mješavine niže temperature od optimalne je u krajnosti preskupa i ne izvodi se, jer se na samu proizvodnju mora dodati trošak prijevoza i ugradnje, a s obzirom da je ugrađena nekvalitetna mješavina, i trošak naknadnog uklanjanja ugrađenog sloja asfalta. Posebnosti proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina detaljno će biti opisane u poglavlju 4.2. ovog rada.

Tople asfaltne mješavine su klasične mješavine kojima je dodan dodatak u bitumen ili u mješavinu, a kojim se postiže smanjenje temperature. Istraživanja svojstava toplih asfaltnih mješavina su posebno intenzivirana posljednjih godina jer se, zbog sniženih temperatura proizvodnje, njima ostvaruje korist i uštede energije uložene u procesu proizvodnje [32], [33], [34] i [35].

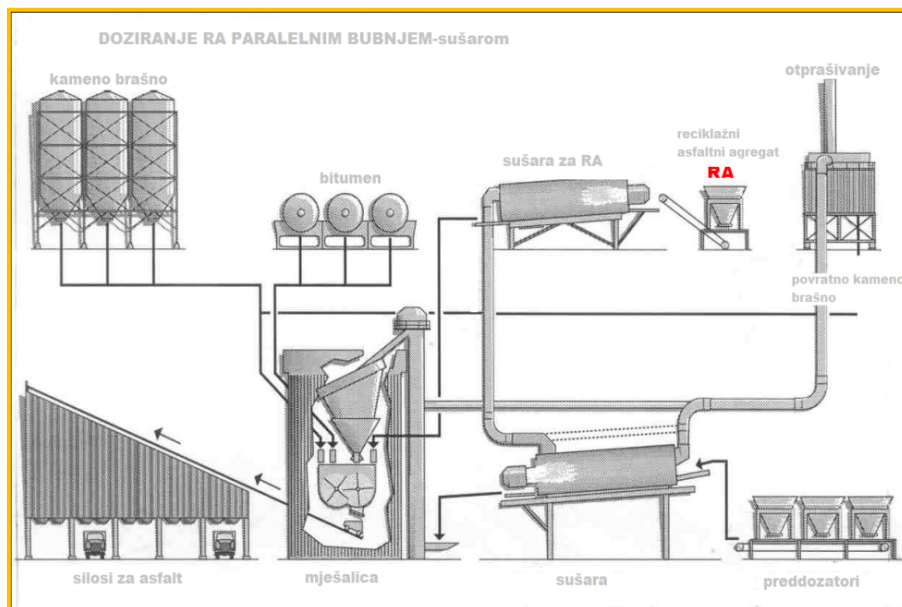
Tehnologije snižavanja temperatura toplih asfaltnih mješavina su različite:

1. snižavanje temperature dodatkom upjenjenog bitumena; radi se o tehnologiji u kojoj se voda pod tlakom u cjevovodu miješa s vrućim bitumenom. Dosadašnja praksa utvrdila je da s oko 2-3% dodane vode pod tlakom u vrući bitumen moguće je sniziti temperaturu proizvodnje asfalta između 20 i 30°C [55] i [56]
2. snižavanje temperature različitim dodacima dodanim u bitumen ili u asfaltnu mješavinu, poput mineralnih (zeolit, itd.) i organskih dodataka (parafini, spojevi estera, itd.) [55], [56]. Za dodavanje kemijskih dodataka u asfaltnu mješavinu potrebno je na asfaltnoj bazi imati tehničko rješenje tog problema (skladištenje, cjevovod, itd.) dok je dodavanje u bitumen praktičnije jer se može dozirati već kod utovara u rafineriji bitumena i takav gotovi proizvod dopremiti na asfaltnu bazu.
3. snižavanje temperature kemijski izmijenjenim vezivom [57], [58]
4. snižavanje temperature dodatkom reciklažnog asfaltnog agregata (*RA*), tehnologijom kojom se na indirektan način smanjuje temperatura proizvodnje. Reciklažni asfaltni agregat dobiven je glodanjem postojećeg „starog“ kolnika, drobljenjem i prosijavanjem na odgovarajuću frakciju, najčešće frakcije 0/16 mm. Tako dobivena frakcija dodaje se

u određenom postotku u proizvodnji „nove“ asfaltne mješavine [59], [60]. Primjeri različitog načina doziranja reciklažnog asfaltne agregata prikazani su na slikama 4-1 i 4-2.



Slika 4-1: Načini doziranja RAA na asfaltnoj bazi



Slika 4-2: Doziranje sa paralelnim bubnjem RAA na asfaltnoj bazi

U proizvodnji asfaltnih mješavina po hladnom postupku koriste se bitumenske emulzije i izvode se kao tankoslojne asfaltne prevlake na cestama manjeg prometnog opterećenja. Tankoslojne asfaltne prevlake izvedene po hladnom postupku umješavanjem kamenog

agregata, bitumenske emulzije, vode i dodataka, koji su zamiješani na samom mjestu ugradnje. Polazu se na asfaltnu ili betonsku podlogu na cestama kako bi se poboljšale vozne karakteristike i osigurala zaštita od prodiranja vode u konstrukciju (mikroasfalt).

## **4.2. Posebnosti proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina**

Asfaltne mješavine se dugi niz godina koriste za kolničke zastore cesta svih skupina prometnog opterećenja. Prvi patenti za vruće asfaltne mješavine komercijalnog naziva „Bitulithic“ izdani su oko 1900. godine Frederick J. Warren-u. Tadašnji sastav mješavine činio je bitumen i agregat različitih veličina čestica s postignutom stabilnošću i udjelom niskih šupljina [61]. Od tih prvih početaka do danas, aktivno se razvijala i usavršavala koncepcija asfaltnih mješavina kao i postrojenja za njihovu proizvodnju. Današnja postrojenja su u potpunosti automatizirana, cijeli se proces prati putem računala, s velikim brojem kontrolnih točaka tijekom proizvodnje kako bi se pogreške u proizvodnji svele na najmanju moguću mjeru. Kapaciteti asfaltnih baza definiraju se sposobnošću proizvodnje tone asfaltne mješavine u jednom satu i raspona su od 40 t/h pa do čak preko 500 t/h.

Vruće asfaltne mješavine, proizvode se u postrojenjima za proizvodnju asfaltnih mješavina – asfaltnim bazama; stacionarnim ili mobilnim. Najčešće se koriste dvije vrste asfaltnih postrojenja: postrojenja za proizvodnju asfaltnih mješavina cikličnoga tipa i bubanjsko postrojenje kontinuiranoga rada. U Republici Hrvatskoj pretežito se koriste asfaltna postrojenja cikličnoga tipa.

Tehnološki procesi, koji se odvijaju na jednom asfaltnom postrojenju cikličnoga tipa sastoje se od sljedećih operacija:

- predoziranje kamenih frakcija
- sušenje i zagrijavanje mineralne mješavine
- otprašivanje muljevito prašinstih čestica iz mineralne mješavine
- prosijavanje vruće mineralne mješavine
- doziranje (maseno ili volumetrijsko) pojedinih frakcija iz mineralne mješavine
- doziranje bitumena
- miješanje zagrijane mineralne mješavine s vezivom
- uskladištenje vruće asfaltne mješavine i odvoz na gradilište.

Za predoziranje frakcija kamene sitneži i pijeska služe predozatori: serija 4-5 spremnika koji na svom dnu imaju otvore s mehanizmom za ispuštanje materijala. Sušenje i zagrijavanje kamene mješavine obavlja se u rotacijskom bubnju za sušenje. Bubanj ima plamenik koji baca intenzivan plamen po gotovo čitavoj dužini bubnja. Okretanjem bubnja, uz pomoć unutrašnjih spiralnih lopatica kamena smjesa se diže i s najviše točke ispušta kroz plamen. Svaka čestica kamene mješavine prođe i po nekoliko puta kroz plamen tako da se može dobro osušiti i zagrijati. Otprašivanje prašinih čestica iz kamene mješavine se provodi u uređaju za otprašivanje koji se sastoji od jakih ventilatora i skupljača otprašenih čestica. Osušena, zagrijana i otprašena kamena smjesa iz rotacijskog bubnja se elevatorom prenosi u centralni dio baze gdje se prosijava na dvije, tri ili više frakcija te važe i ispušta u miješalicu. U miješalicu se dodaje nezagrijano kameno brašno te se najprije izmiješa kamena sitnež i punilo što traje oko 5 sekundi, a zatim se dodaje zagrijani bitumen i miješa sve dok se ne postigne potpuno obavijanje svih kamenih zrna. Temperatura asfaltne mješavine pri miješanju ovisi o temperaturi kamene sitneži, bitumena i kamenog brašna i može utjecati na kvalitetu proizvedene asfaltne mješavine odnosno mogućnost njene ugradnje. Temperatura mješavine se, iz navedenih razloga, mora strogo kontrolirati pri procesu proizvodnje. Nakon miješanja, asfaltna mješavina se odmah istovara u kamion ili pohranjuje u silos za skladištenje iz kojeg se može utovarivati u kamione te prevoziti do mjesta ugradnje.

Dimnjak za ispušne plinove na kraju proizvodnog procesa u asfaltnom postrojenju, u atmosferu ispušta zagrijane filtrirane plinove odnosno znatne količine toplinske energije. Ispušni plinovi su mješavina izgorjelog energenta (plina ili lož ulja) i čestica prašine, u svome sastavu sadrže i vodenu paru te imaju visoku izlaznu temperaturu. Čestice koje izlaze iz dimnjaka se obavezno moraju provjeriti kako bi se utvrdio njihov udio prema normi HRN EN 13284-1 [62].

Temperatura ispušnih plinova kreće se od 105-220°C kod proizvodnje standardne vruće asfaltne mješavine dok kod proizvodnje mješavine sa recikliranim asfaltom temperatura ispušnih plinova može dosegnuti i 250°C. Temperatura ovisi i o izvedbi asfaltnog postrojenja te dužini puta koji plin prolazi prije ispuštanja u okoliš te su najviše vrijednosti temperatura upravo na spoju izlaznog kanala sa rotacijskim bubnjem. U sastavu ispušnih plinova osim vodene pare nalaze se i kemijski spojevi poput ugljičnog dioksida i monoksida CO<sub>2</sub>, CO te sumporovih spojeva SO<sub>2</sub> i SO<sub>3</sub>.

Veliki broj kontrolnih točaka tijekom proizvodnje asfaltne mješavine, omogućuje uočavanje eventualnih pogrešaka u proizvodnji i njihovo svođenje na najmanju moguću mjeru.



Sve kontrolne točke na asfaltnoj bazi prikazane su na ekranu operatera u kontrolnom tornju. Prije svega, potrebno je sve te točke provjeriti i dovesti ih u početno stanje, odnosno u stanje koje će kasnije u proizvodnji pokazivati točne vrijednosti. Najčešće se spominje efikasnost plamenika, što znači da je izgaranje i količina dotoka goriva u skladu sa stvarno mjerenom potrošnjom. Ujedno i kontrola temperature agregata je jedan podatak kojim se kontrolira rad plamenika. Plamenik se nalazi na jednoj strani rotacijskog bubnja za sušenje, što ujedno i predstavlja prvu točku gubitka energije topline. Sam rotacijski bubanj mora imati dobru toplinsku izolaciju. U ovom dijelu je kontrolna točka temperatura iz bubnja za sušenje. Putem elevatora vrućih frakcija materijal pada na sita (u cikličnom načinu rada) i prosijavanjem se dobivaju frakcije s vrlo malo tzv. podzrnja i nadzrnja frakcije. Svaka frakcija ima svoju komoru gdje se skladišti. Sita se nalaze u tornju asfaltne baze koji također mora biti dobro izoliran, da se frakcije materijala ne hlade prevelikim intenzitetom. Iz komora vrućih frakcija doziraju se frakcije kamenih materijala (agregata) koja padaju na vagu. Svaka komponenta se zasebno važe i ima svoju određenu točnost. Frakcije kamenih materijala važu se s točnošću od 10 kg, a punilo i bitumen s točnošću od 1 kg. Kod cikličkog načina rada i ovisnosti kapaciteta asfaltne baze, jedna šarža (jedan ciklus miješanja komponenti) iznosi 2000 kg (npr. kod miješanja 180 t/h). Što nadalje znači da kod asfaltnih baza s većim kapacitetom se povećava i masa šarže. Sve zajedno u miješalici se izmiješa i skladišti se u silosu. Silos mora biti izuzetno dobro izoliran da gotov proizvod može u njemu stajati i do par sati. Ovdje je također kontrolna točka temperatura gotovog proizvoda, koja se za svaku šaržu pohranjuje u računalo.

Asfaltno postrojenje se može raščlaniti na tri osnovna dijela koji čine najveći dio troškova energenata:

- plamenik u rotacijskom bubnju
- elektromotori (svi na asfaltnoj bazi)
- spremnici za bitumen.

Kvalitetnim svakodnevnim praćenjem i kontroliranjem nabrojana tri osnovna dijela asfaltne baze mogu se postići efikasnost cjelokupnog postrojenja.

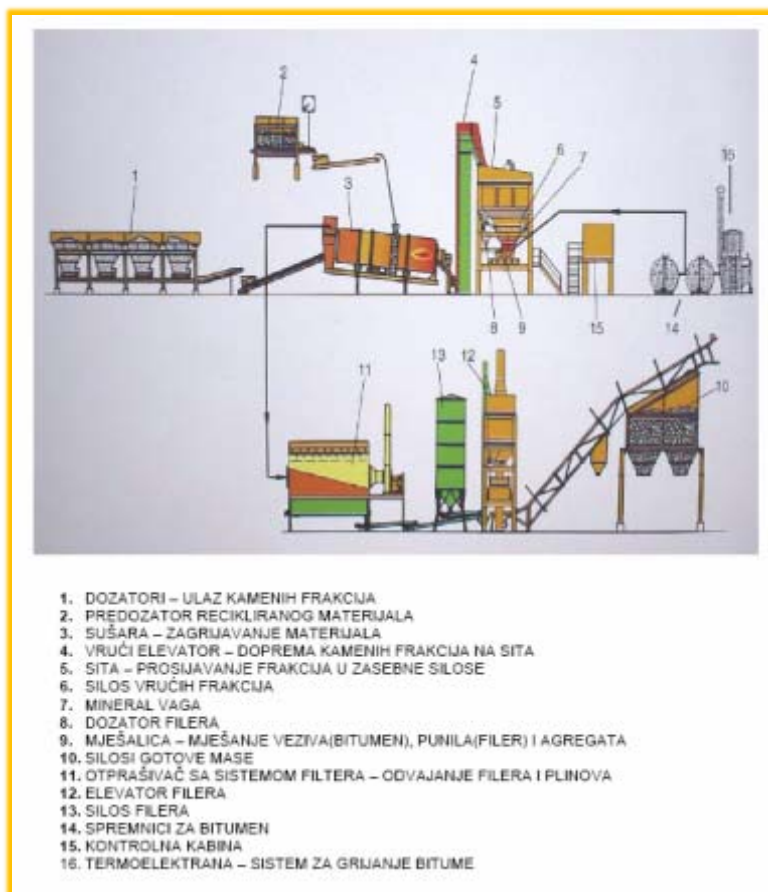
### 4.3. Ocjena kvalitete asfaltnih mješavina

Asfaltna mješavina (bitumenska mješavina, asfalt) sastavljena je od kamenog materijala i veziva. Kameni materijal se sastoji od frakcija agregata i punila (kamenno brašno 0/0,25 mm), te veziva koje je najčešće bitumen. Frakcije agregata su nazivne veličine agregata a to su: 0/2, 0/4, 2/4, 4/8, 8/11, 8/16, 16/22 i 16/32 mm. Na *slici 4-3* prikazane su frakcije kamenih materijala. Svaki sastavni materijal mora se ispitati i za to imati potrebnu dokumentaciju odnosno potrebne dokaze o uporabljivosti (izjave o svojstvima) koje su u skladu s tehničkim uvjetima. Kada su sirovine ispitane i dokazana je njihova kvaliteta traži se optimalni sastav u odnosu na zadane uvjete. Do optimalnog sastava dolazi se laboratorijskim ispitivanjima.



*Slika 4-3: Frakcije kamenih materijala*

Nakon odabira laboratorijskog optimalnog sastava na asfaltnu bazu se prenosi receptura (pojedinačni sastav svih komponenti izražen u postotku). Proces miješanja asfaltne mješavine obavlja se na postrojenju asfaltne baze.



Slika 4-4: Shematski prikaz asfaltne baze s pojedinim elementima

Na slici 4-4 prikazan je shematski prikaz asfaltne baze gdje se može vidjeti tijekom proizvodnje asfaltne mješavine. Za vrijeme proizvodnje potrebno je provesti uzorkovanje asfaltnih mješavina zbog kontroliranja zadanog sastava na asfaltnoj bazi s projektom sastava asfalta izrađenim u laboratoriju. Nakon zamiješane asfaltne mješavine u laboratoriju ili na asfaltnoj bazi pristupa se izradi početnog ispitivanja tipa (ITT - *Initial type test*) sukladno normi HRN EN 13108-20 [63]. Rezultati ispitivanja asfaltnih mješavina deklariraju se razredima, kategorijama ili deklariranim vrijednostima prema normi specifikacije asfaltne mješavine. Kada je izrađeno početno ispitivanje tipa i kad je pripremljena dokumentacija sukladno HRN EN 13108-21 [64] tada se može započeti postupak pregleda kontrole tvorničke proizvodnje. Poslije pregleda dobiva se certifikat o sukladnosti kontrole tvorničke proizvodnje temeljem čega se pišu izjave o svojstvima (prema direktivi EU 305/2011), oznake proizvoda i tehničke upute. Tijekom proizvodnje obavlja se uzorkovanje mješavina i nakon provedenih ispitivanja obavezno jednom tjedno mora se dati ocjena proizvoda sukladno normi HRN EN 13108-21 [64].

COLAS Hrvatska d.d. Međimurska 26 42 000 Varaždin												
OCL Operating Compliance Level zadnja 32 rezultata												
Asfaltna baza: AB Motičnjak-2014												
Period ocjenjivanja: od 14-svi-2014. do 18-lip-2014.												
Redni broj	Broj uzorka	Datum uzorkovanja	Bitumenska mješavina	Prethodni sastav	Šifra asfalta	0,063	sito 1	2	D/2	D	Bitmen	Ocjena
1	AUV-66/14	14-svi-2014.	AC 22 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-206/12-M	2202	0,4	-2,7	-2,0	1,3	0,4	0,0	sukladan
2	AUV-67/14	15-svi-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-202/12-M	2104	0,6	-1,2	-0,5	-1,6	0,0	0,0	sukladan
3	AUV-68/14	19-svi-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,6	0,9	0,5	-1,6	0,0	-0,1	sukladan
4	AUV-70/14	20-svi-2014.	SMA 16 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-232/13-M	2315	-0,1	0,1	-0,4	6,1	-3,6	0,0	sukladan
5	AUV-71/14	20-svi-2014.	SMA 16 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-232/13-M	2315	-1,5	-0,9	-2,4	7,1	-0,6	-0,1	sukladan
6	AUV-72/14	21-svi-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,4	-3,1	-3,5	-8,6	0,0	-0,1	sukladan
7	AUV-73/14	21-svi-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-202/12-M	2104	1,4	-3,2	-2,5	-3,6	-3,0	0,2	sukladan
8	AUV-75/14	22-svi-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,9	-3,1	-4,5	0,4	-3,0	-0,1	sukladan
9	AUV-76/14	22-svi-2014.	AC 16 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-215/12-M	2303	-0,4	-3,9	-4,6	-1,6	-2,3	-0,1	sukladan
10	AUV-77/14	22-svi-2014.	SMA 11 Pmb 45/80-65	PS/COLAS Hrvatska)-245/14-M	2244	0,2	-1,0	-3,0	-1,0	-6,0	0,1	sukladan
11	AUV-78/14	23-svi-2014.	SMA 16 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-232/13-M	2315	-1,7	-0,9	-1,4	2,1	-4,6	-0,1	sukladan
12	AUV-79/14	23-svi-2014.	SMA 16 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-232/13-M	2315	-1,3	-0,9	-2,4	1,1	-5,6	-0,1	sukladan
13	AUV-80/14	23-svi-2014.	AC 8 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-223/12-M	2503	0,0	-1,7	2,0	-4,6	0,0	0,0	sukladan
14	AUV-81/14	27-svi-2014.	AC 8 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-223/12-M	2503	-0,6	-2,7	2,0	-3,6	-1,0	-0,4	sukladan
15	AUV-85/14	29-svi-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-626/2013-M	2108	-2,8	0,0	2,8	0,7	0,6	-0,5	sukladan
16	AUV-90/14	31-svi-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-230/13-M	2403	0,1	-0,4	0,4	-3,7	-1,5	-0,1	sukladan
17	AUV-91/14	31-svi-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-201/12-M	2402	-0,7	-1,3	1,0	-6,0	-1,8	-0,3	sukladan
18	AUV-98/14	2-lip-2014.	AC 8 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-218/12-M	2506	-0,4	1,5	4,2	5,4	-1,2	0,1	sukladan
19	AUV-99/14	3-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-202/12-M	2104	0,7	-1,2	-0,5	0,4	0,0	0,2	sukladan
20	AUV-100/14	4-lip-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-219/12-M	2408	0,2	-1,7	0,4	1,1	-0,5	0,1	sukladan
21	AUV-101/14	5-lip-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-219/12-M	2408	-0,4	-2,7	-1,6	1,1	-1,5	0,2	sukladan
22	AUV-109/14	11-lip-2014.	SMA 11 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-222/12-M	2413	-0,2	1,0	-1,1	-1,5	-1,3	-0,3	sukladan
23	AUV-110/14	11-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,6	-3,1	-3,5	-5,6	0,0	0,1	sukladan
24	AUV-111/14	12-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,3	-3,1	-4,5	-1,6	0,0	-0,1	sukladan
25	AUV-112/14	12-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,8	-2,1	-3,5	-0,6	0,0	-0,1	sukladan
26	AUV-114/14	13-lip-2014.	AC 16 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-209/12-M	2301	0,1	-3,9	-3,4	6,3	-2,2	0,1	sukladan
27	AUV-115/14	14-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	0,8	-1,1	-1,5	-5,6	-3,0	0,0	sukladan
28	AUV-117/14	16-lip-2014.	AC 16 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-209/12-M	2301	-0,4	-1,9	0,6	0,3	-0,2	0,0	sukladan
29	AUV-120/14	17-lip-2014.	AC 22 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-207/12-M	2208	0,4	-2,8	0,4	3,7	0,4	-0,2	sukladan
30	AUV-121/14	17-lip-2014.	AC 32 base 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-203/12-M	2101	1,3	1,9	2,5	0,4	0,0	0,1	sukladan
31	AUV-122/14	18-lip-2014.	SMA 16 Pmb 45/80-65	PS/Cesta-Varaždin)-232/13-M	2315	-2,4	-1,9	-2,4	-0,9	-5,6	0,3	sukladan
32	AUV-123/14	18-lip-2014.	AC 11 surf 50/70	PS/Cesta-Varaždin)-211/12-M	2406	-0,5	-3,3	-1,8	-3,7	-1,5	-0,3	sukladan

Slika 4-5: Primjer izrade ocjene sukladnosti asfaltna mješavine (izvorno autorsko)

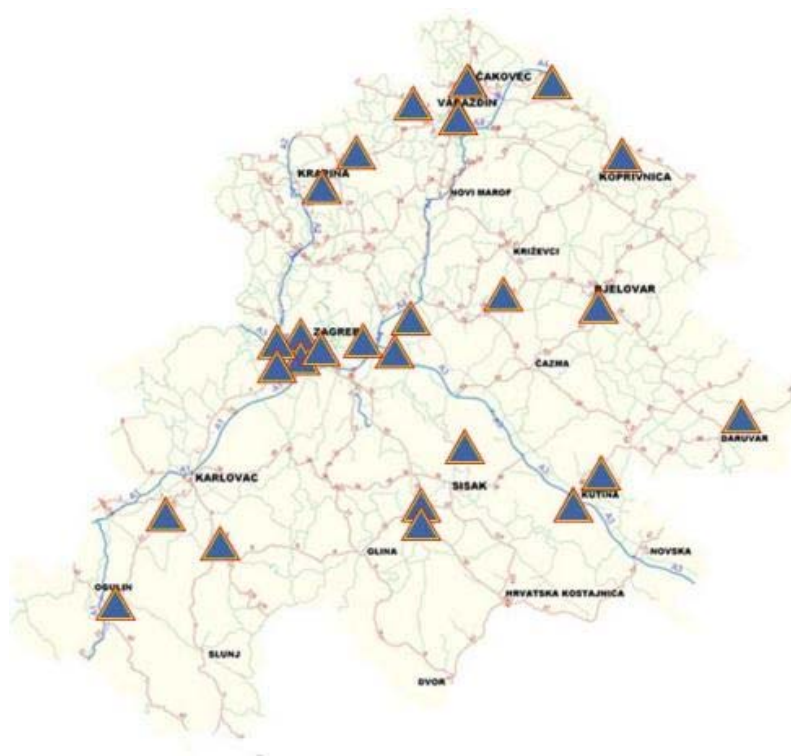
Za praćenje rezultata ispitivanja svih sirovina i asfaltnih mješavina u poduzeću COLAS Hrvatska d.d. osmišljena je i razvijena aplikacija „QColas“ pomoću koje se prate sva ispitivanja i daju ocjene proizvoda prema deklariranim vrijednostima [58].



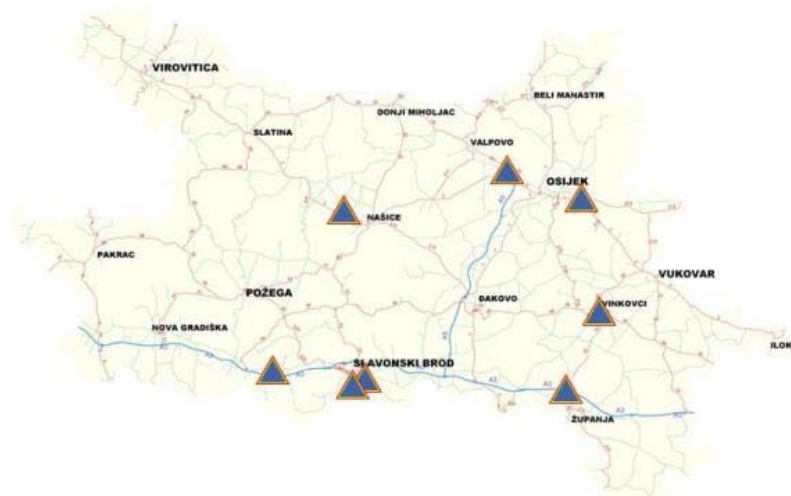
Slika 4-6: Sučelje aplikacije „QColas“ (izvorno autorsko)

#### 4.4. Smještaj i kapaciteti asfaltnih baza u Hrvatskoj

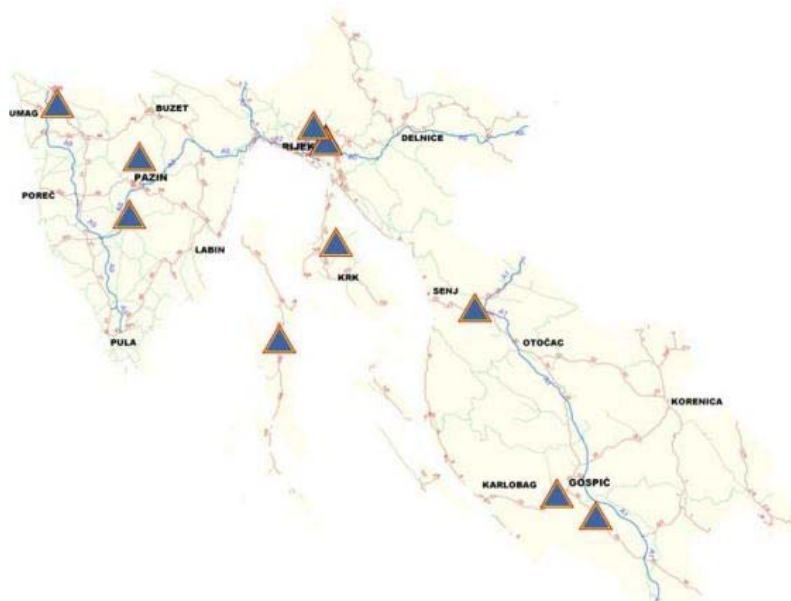
Prema podacima kojima raspolaže *Hrvatsko asfaltersko društvo (HAD)* asfaltne baze podijeljene su na 4 regije u Hrvatskoj. Od ukupno 56 asfaltnih baza u središnjoj Hrvatskoj smješteno je 26. Istočni dio Hrvatske broji 8 asfaltnih baza, regija Istra, Primorje i Lika broje 10 asfaltnih baza i regija Dalmacije i Dubrovačko Primorje broji 12 asfaltnih baza [65].



Slika 4-7: Raspored asfaltnih baza središnje Hrvatske [65]



Slika 4-8: Raspored asfaltnih baza istočne Hrvatske [65]



*Slika 4-9: Raspored asfaltnih baza regije Istre, Primorja i Like [65]*



*Slika 4-10: Raspored asfaltnih baza regije Dalmacije i Dubrovačkog primorja [65]*

U tablici 4-2 prikazane su asfaltna baza u regiji 1 položajno i prema proizvodnim kapacitetima. Raspon kapaciteta kreće se od 50 t/h do čak 250 t/h. Ukupni kapacitet asfaltnih baza u regiji 1 je 2910 t/h.

Tablica 4-2: Prikaz regije 1 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu [65]

Regija 1: središnja Hrvatska		
Redni broj	Lokacija	Kapacitet (t/h)
1.	Dužica	80
2.	Kutina	160
3.	Vrbovec-Gradec	70
4.	Novo Svibje	150
5.	Rakitje	70
6.	Prelog	150
7.	Donji Kraljevec	90
8.	Kutina	50
9.	Rakitje	160
10.	Rakitje	140
11.	Trstenik	160
12.	H. Žarište	90
13.	Motičnjak	250
14.	Lepoglava	200
15.	Majerje	100
16.	Banja Selo	120
17.	Golubovec	80
18.	Grubišno polje	80
19.	Zvečaj	50
20.	Bjelovar	60
21.	Peteranec	90
22.	Samobor	70
23.	Ježdovec	130
24.	Petrinja	50
25.	Petrinja	100
26.	Tounj	160
<b>Minimalni kapacitet:</b>		<b>50</b>
<b>Maksimalni kapacitet:</b>		<b>250</b>
<b>Ukupni kapacitet:</b>		<b>2910</b>
<b>Srednji kapacitet:</b>		<b>111,92</b>

Tablica 4-3: Prikaz regije 2 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu [65]

<b>Regija 2: istočna Hrvatska</b>		
<b>Redni broj</b>	<b>Lokacija</b>	<b>Kapacitet (t/h)</b>
1.	Sl. Brod	120
2.	Županja	120
3.	Lužani	150
4.	Nemetin	130
5.	Petrijevci	90
6.	Vinkovci	120
7.	Orahovica	140
8.	Sl. Brod	120
<b>Minimalni kapacitet:</b>		<b>90</b>
<b>Maksimalni kapacitet:</b>		<b>150</b>
<b>Ukupni kapacitet:</b>		<b>990</b>
<b>Srednji kapacitet:</b>		<b>123,75</b>

Tablica 4-4: Prikaz regije 3 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu [65]

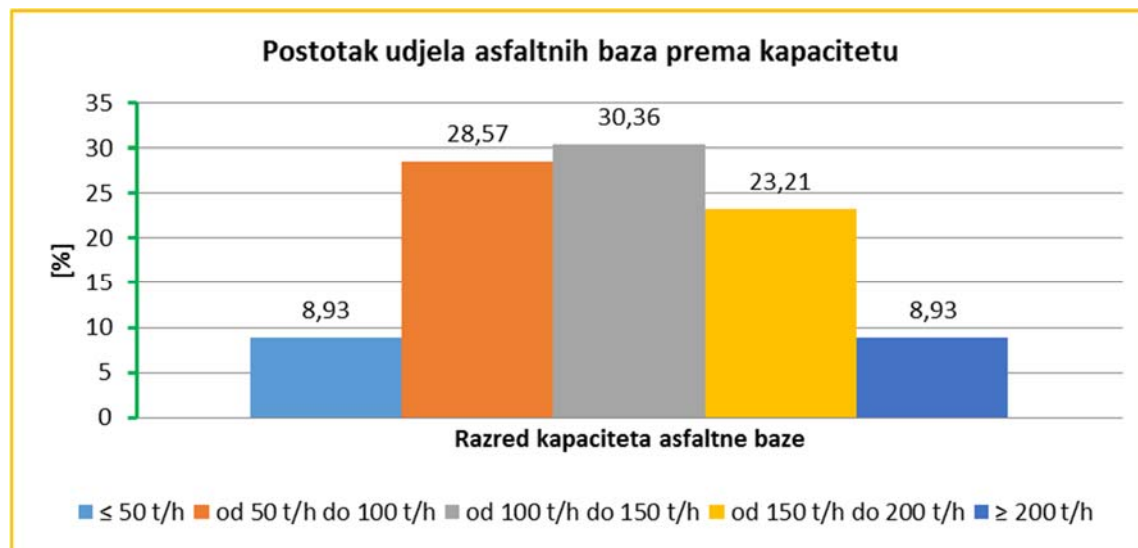
<b>Regija 3: Istra, Primorje i Lika</b>		
<b>Redni broj</b>	<b>Lokacija</b>	<b>Kapacitet (t/h)</b>
1.	Oštra (Gospić)	95
2.	Cres	110
3.	Garica	110
4.	Marinščina	90
5.	Pazin	160
6.	Žminj	240
7.	Plovanija	200
8.	Rijeka (Grobnik)	140
9.	Žuta lokva	120
10.	Papuča	80
<b>Minimalni kapacitet:</b>		<b>80</b>
<b>Maksimalni kapacitet:</b>		<b>240</b>
<b>Ukupni kapacitet:</b>		<b>1345</b>
<b>Srednji kapacitet:</b>		<b>134,50</b>



Tablica 4-5: Prikaz regije 4 asfaltnih baza prema lokaciji i kapacitetu [65]

Regija 4: Dalmacija i Dubrovačko primorje		
Redni broj	Lokacija	Kapacitet (t/h)
1.	Križice	160
2.	Zapužane	160
3.	Opuzen	120
4.	Zagvozd	160
5.	G. Zemunik	160
6.	Bijeli Vir	80
7.	Vrgorac	50
8.	Posedarje	160
9.	čvor Pirovac (Stankovci)	100
10.	Korčula (kod Blata)	40
11.	Vrgorac (Ravča)	200
12.	Solin	70
<b>Minimalni kapacitet:</b>		<b>40</b>
<b>Maksimalni kapacitet:</b>		<b>200</b>
<b>Ukupni kapacitet:</b>		<b>1460</b>
<b>Srednji kapacitet:</b>		<b>121,67</b>

Ukupni instalirani kapacitet postrojenja za proizvodnju asfaltnih mješavina u Hrvatskoj iznosi 6 705 t/h [65].



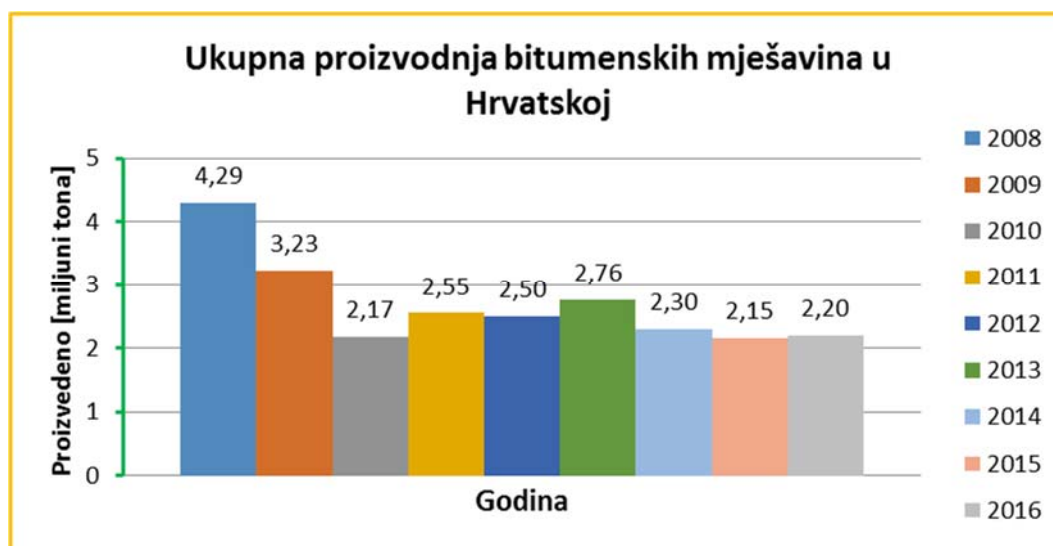
Slika 4-11: Postotak udjela asfaltnih baza prema kapacitetu

## 4.5. Količina proizvodnje asfaltnih mješavina

Posljednjih godina *HAD* prati količinu proizvodnje asfaltnih mješavina. U tablici 4-5 prikazana je proizvodnja asfaltnih mješavina u Hrvatskoj od 2008 do 2016 godine. Proizvodnja mješavina u državama Europe u periodu od 2007. do 2012. prikazana je u *tablici 4-6*. Asfaltne mješavine oznake AC (*asphalt concrete*) je prema europskoj normi HRN EN 13108-1 [66] i označava asfaltbeton. Mješavina oznake BBTM (*Beton Bitumineux Tres Mince*) je prema normi HRN EN 13108-2 [67] i označava asfaltbeton za vrlo tanke slojeve te oznaka SMA (*stone mastic asphalt*) je prema HRN EN 13108-5 [68] i ima značenje splitmastikasfalta.

Tablica 4-6: Proizvodnja asfaltnih mješavina od 2008 do 2016 godine u Hrvatskoj [69]

Godina			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Proizvedeno		[milijuni tona]	4,29	3,23	2,17	2,55	2,50	2,76	2,30	2,15	2,20
Prema vrsti asfaltne mješavine	AC	[%]	94,6	96,0	95,0	96,0	95,0	91,0	91,0	92,0	93,3
	BBTM	[%]	-	-	-	1,0	1,0	3,0	2,0	0,5	1,5
	SMA	[%]	5,4	4,0	5,0	3,0	4,0	6,0	7,0	7,5	5,1
Prema položaju u kolniku	habajući sloj	[%]	44,7	51,0	57,0	54,5	58,5	54,0	61,0	58,5	63,0
	vezni sloj	[%]	5,9	8,0	3,5	4,3	3,7	4,9	2,0	1,5	1,5
	nosivi sloj	[%]	49,4	41,0	39,5	41,2	3,8	41,1	37,0	40,0	35,5

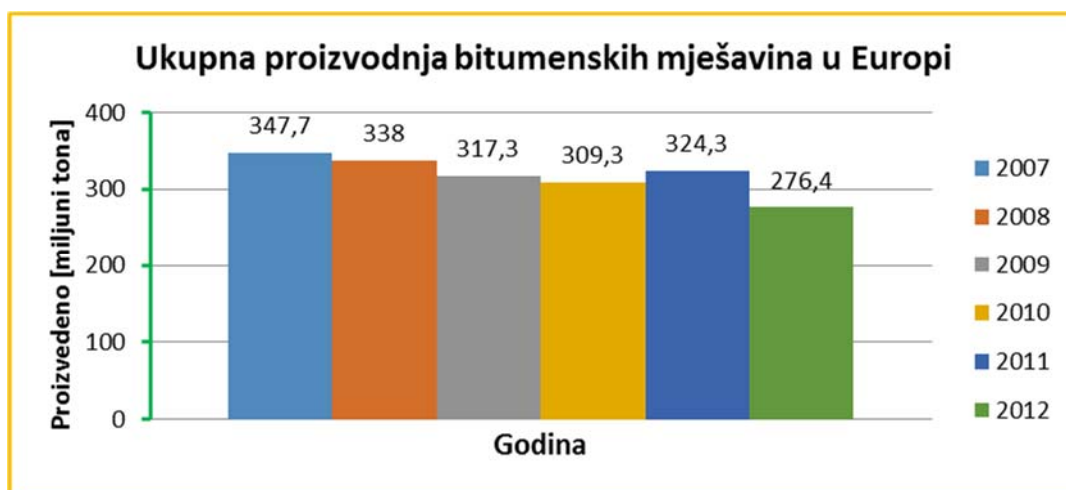


Slika 4-12: Trend proizvodnje asfaltnih mješavina

Proizvodnja asfaltnih mješavina od 2010. do 2016. godine je prepolovljena čemu u prilog govori činjenica o teškom stanju u gospodarstvu. Na *slici 4-13* vidljiv je negativan trend količine proizvodnje asfaltnih mješavina u Europi.

Tablica 4-7: Proizvodnja asfaltnih mješavina u državama Europe u milijunima tona [69]

Država	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Austrija	9,5	9,5	9,0	8,2	8,0	7,2
Belgija	4,5	4,9	4,7	4,8	5,9	5,6
<b>Hrvatska</b>	<b>3,7</b>	<b>4,2</b>	<b>3,2</b>	<b>2,7</b>	<b>2,6</b>	<b>2,5</b>
Češka	7,0	7,3	7,0	6,2	5,8	5,6
Danska	3,3	3,1	2,7	3,2	4,0	3,6
Estonija	1,5	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1
Finska	5,9	6,0	5,2	4,9	5,0	4,5
Francuska	42,3	41,8	40,1	38,8	39,2	35,3
Njemačka	51,0	51,0	55,0	45,0	50,0	41,0
Velika Britanija	25,7	25,0	20,5	21,5	22,4	18,5
Grčka	8,0	8,1	8,7	5,2	2,3	1,6
Mađarska	3,3	2,5	1,6	3,4	2,3	2,5
Island	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Irska	3,3	2,8	3,3	2,3	1,8	1,9
Italija	39,9	36,5	34,9	29,0	28,0	23,2
Latvija	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Litva	1,7	2,2	1,5	1,6	1,6	1,3
Luksemburg	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6
Nizozemska	10,2	9,3	9,8	9,5	9,6	9,2
Norveška	5,9	5,7	6,5	5,9	6,7	6,3
Poljska	18,0	15,0	18,0	18,0	26,5	21,1
Portugal	9,0	9,0	9,0	6,7	6,4	6,4
Rumunjska	3,2	3,3	3,6	3,2	3,6	3,2
Slovačka	2,2	2,2	2,2	1,9	2,2	1,9
Slovenija	2,1	2,6	2,3	1,8	1,3	1,1
Španjolska	49,9	42,3	39,0	34,4	29,3	19,5
Švedska	7,7	8,7	8,1	7,9	8,1	7,7
Švicarska	5,2	5,3	5,4	5,3	5,4	4,8
Turska	22,2	26,6	23,1	35,3	43,5	38,4
<b>Ukupno u Europi [milijuna tona]</b>	<b>347,7</b>	<b>338,0</b>	<b>317,3</b>	<b>309,3</b>	<b>324,3</b>	<b>276,4</b>



Slika 4-13: Trend proizvodnje asfaltnih mješavina u Europi

## 5. KOLIČINE EMISIJA S ASFALTNIH BAZA U HRVATSKOJ

### 5.1. Analiza ispušnih plinova kod proizvodnje

Prema *Uredbi o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora* [8] za proizvođače asfaltnih mješavina obavezna su mjerenja koncentracije otpadnih plinova iz stacionarnih izvora. Ispušni plinovi na asfaltnoj bazi izlaze u atmosferu iz dimovodne cijevi. Ti plinovi su mješavina izgorjelog plina (ili lož ulja) iz plamenika i čestica prašine. Na kraju blago zakošenog rotacijskog bubnja za sušenje nalazi se plamenik koji ima funkciju da plin koji dolazi sagorijeva u plameniku i daje otvoreni plamen koji je usmjeren u bubanj za sušenje. Količinu otvorenog plamena operater asfaltne baze može kontrolirati. U normalnim radnim uvjetima od oko 70% kapaciteta asfaltne baze otvoreni plamen dolazi između polovine i  $\frac{3}{4}$  ukupne duljine bubnja za sušenje. Frakcije kamenog materijala putuju kroz rotacijski bubanj za sušenje otprilike oko jedne minute. Temperature u bubnju se kreću od oko 170°C pa na više ovisno o količini i vlažnosti agregata te tipu asfaltne mješavine kao i o dodacima u asfaltnu mješavinu (npr. reciklažni asfaltni agregat, RA).



*Slika 5-1: Otvoreni plamen iz plamenika usmjeren u rotacijski bubanj [70]*

Na *slici 5-1* prikazan je rotacijski bubanj s plamenikom. Bubanj za sušenje služi da se frakcije kamenih agregata u njemu suše i zagrijavaju odnosno da frakcije agregata izlaskom iz

bubnja ne sadrže udio vode. U bubnju se nalaze dva izlaza. Jedan se odnosi na izlaz čestica frakcija kamenih materijala manjeg od 0,71 mm (1 mm), dok drugi služi za izlaz osušenih frakcija većih od 0,71 mm (1 mm) na elevator vrućih frakcija i dalje u proizvodnju. Čestice materijala manjih od 0,71 mm idu do opreme za otprašivanje putem tzv. ciklona. Već na samom ulazu sistema za otprašivanje nalaze se filteri koje čestice se sudaraju sa njima te padaju na dno (veličina čestice od 0,50 mm na više) te dalje putem trake idu natrag u proizvodnju. One druge pak prolaze te filtere i putuju na vibrirajuće vrećaste filtere koji su otporni na visoke temperature te ti vrećasti filteri ih zadržavaju i putem vibracija tresu na dno gdje se nalazi beskonačna traka koja ih šalje u silos punila gdje se skladišti višak punila (vlastito punilo). Sve čestice koji svi filteri zajedno nisu uspjeli zadržati izlaze u okoliš kroz dimovodnu cijev zajedno sa plinom iz bubnja za sušenje. Te čestice koje izlaze kroz dimovodnu cijev obavezno su mjerene kako bi se utvrdio njihov udio prema HRN EN 13284-1 *Određivanje niskih razina masenih koncentracija prašine - 1. dio: Ručna gravimetrijska metoda* [62]. Mjerenja koncentracija otpadnih plinova obavlja tvrtka ovlaštena od Ministarstva zaštite okoliša i prostornoga uređenja te akreditirana od strane Hrvatske akreditacijske agencije.

COLAS Hrvatska d.d. u vlasništvu je četiri asfaltne baze na kojima se redovno provode mjerenja otpadnih plinova. Položajno asfaltne baze se nalaze:

- 1) Asfaltna baza Motičnjak - Varaždin
- 2) Asfaltna baza Lepoglava - Lepoglava
- 3) Asfaltna baza Posedarje - Posedarje
- 4) Asfaltna baza Ploče - Kula Norinska.



Slika 5-2: Asfaltna baza Lepoglava u Lepoglavi (COLAS Hrvatska d.d.)



*Slika 5-3: Asfaltna baza Motičnjak u Varaždinu (COLAS Hrvatska d.d.)*



*Slika 5-4: Asfaltna baza Posedarje u Posedarju (COLAS Hrvatska d.d.)*



*Slika 5-5: Asfaltna baza Ploče u mjestu Kula Norinska (COLAS Hrvatska d.d.)*

Mjerenja se provode u skladu s normama za ispitivanja:

- ISO 12039:2002 Emisije iz stacionarnih izvora - Određivanje ugljikova monoksida, ugljikova dioksida i kisika - Značajke automatskih mjernih sustava i njihova kalibracija
- ISO 10849:1996 Emisije iz stacionarnih izvora - Određivanje masene koncentracije dušikovih oksida - Značajke automatskih mjernih sustava
- ISO 7935:1996 Emisije iz stacionarnih izvora - Određivanje masene koncentracije sumporovog dioksida - Značajke rada automatskih mjernih metoda
- HRN ISO 10780:1996 Emisije iz stacionarnih izvora - Mjerenje brzine i obujamskog protoka plinova u odvodnom kanalu
- HRN ISO 9096:2003 Emisije iz nepokretnih izvora - Ručna metoda određivanja masene koncentracije čestica.

U *tablicama 5-1 i 5-2* iskazane su vrijednosti mjerenja ispušnih plinova i ostalih karakteristika, kao što su brzina i temperatura na izlazu iz dimovodne cijevi asfaltne baze.

*Tablica 5-1: Rezultati mjerenja ispušnih plinova na asfaltnim bazama [55]*

Mjesto mjerenja		AB Motičnjak	AB Lepoglava	AB Posedarje	AB Ploče
Parametar	Mjerna jedinica				
$t_{okoline}$	°C	38,1	39,0	21,1	13,2
CO	mg/m <sup>3</sup>	136,8	700,7	251,2	1320,3
O <sub>2</sub>	vol%	18,0	15,9	15,4	15,5
NO	mg/m <sup>3</sup>	20,6	35,1	-	32,8
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	31,6	53,9	-	50,3
CO <sub>2</sub>	g/m <sup>3</sup>	3,4	5,0	3,8	7,8
Rezultati mjerenja svedeni na referentni udio kisika od 17 vol%					
CO	mg/m <sup>3</sup>	182	549,5	179,0	969,4
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	42,6	41,9	-	36,8

*Tablica 5-2: Rezultati mjerenja ostalih parametara na asfaltnim bazama [55]*

Parametar	Mjerna jedinica	AB Motičnjak	AB Lepoglava	AB Posedarje	AB Ploče
Površina presjeka mjerenja	m <sup>2</sup>	1,7663	0,9499	0,7850	0,7850
Vlaga u dimovodu - suhi plin	g/m <sup>3</sup>	68	125	-	173
Srednja brzina u dimovodu	m/s	10,3	14,5	12,72	23,6
Temperatura uzorkovanja	°C	62,8	80,8	49,8	105,8
Protok plinova - radni uvjeti	m <sup>3</sup> /h	65459	49442	46968,1	66802
Protok suhih plinova	m <sup>3</sup> /h	51971	36868	35724,4	47466
Krute čestice	mg/m <sup>3</sup>	6,9	10,2	21,7	14,7



U izračun je uzeta samo jedna godina proizvodnje asfaltne mješavine, jer iz tablice 5-3 se može vidjeti ujednačenost proizvodnje prijašnjih godina prema vrsti i položaju u kolniku asfaltnih mješavina. *Tablica 5-3* prikazuje izračun potrošnje energije po 1 t proizvedene asfaltne mješavine.

*Tablica 5-3: Podaci o proizvodnji i utrošenoj energiji asfaltnih baza COLAS Hrvatska d.d. [55]*

Asfaltna baza		Motičnjak	Lepoglava	Posedarje	Ploče
Proizvedeno u 2013. godini	[t]	114.372,98	116.743,70	40.680,69	108.697,32
Utrošak goriva bubnja za sušenje (plin, lož ulje) <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> ili l	845.757,00 plin	806.624,00 plin	334.940,00 lož ulje	860.720,96 lož ulje
Grijanje tankova bitumena (električna energija, plin, diesel agregat) <sup>1</sup>	kWh, m <sup>3</sup> i l	88.200,30 el. energija	52.423,00 plin	41.717,05 Diesel agregat	25.469,52 Diesel agregat
Električna energija (pokretanje postrojenja, svi elektromotori, itd.) <sup>1</sup>	kWh ili l	347.907,70	343.591,00	29.794,03 Diesel agregat	90.206,37 Diesel agregat
<b>Potrošnja energije po 1 t proizvedene asfaltne mješavine iz bubnja za sušenje</b>	<b>kWh/t</b>	<b>68,48</b>	<b>63,98</b>	<b>81,43</b>	<b>78,31</b>
Prosječna ukupna energija po 1 t proizvedene asfaltne mješavine	kWh/t	72,29	71,08	99,06	88,99

Napomena: 1m<sup>3</sup> plina = 9,26kWh; 1l lož ulja = 9,89 kWh i 1l diesela = 10,03 kWh

## 5.2. Analiza ispušnih plinova prema proizvedenoj količini mješavina

Analiza ispušnih plinova provedena je prema *Priručniku za vođenje registra onečišćavanja okoliša* izdanog od strane Agencije za zaštitu okoliša [71], [72]. Prikazana su mjerenja po pojedinačnim mjestima s iskazanim vrijednostima, sada se može napraviti izračun količina pojedinih ispušnih plinova po asfaltnim bazama tvrtke COLAS Hrvatska d.d. Ispuštanja onečišćujuće tvari za CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> i čestice izračunava se kao:

$$E_i = E_{Fi} \cdot A \text{ [kg/god]} \quad (3.1.)$$

gdje su:

$E_i$  ispuštanja onečišćujuće tvari [kg/god]

$E_{Fi}$  faktor emisije (iz tablice 3-10)

$A$  proizvedena količina asfaltne mješavine [t/god].

<sup>1</sup> Koeficijenti pretvorbe preuzeti su iz [71]. Uzete su donje ogrjevne vrijednosti. Vrijednosti imaju svoje raspone kvalitete, stoga distributer odnosno proizvođač daje pojedinačne rezultate ispitivanja za isporučenu sirovinu.

Tablica 5-4: Faktori emisije [71]

Onečišćujuća tvar	Faktor emisije (kg/t proizvedenog asfalta)	
	Prirodni plin	Loživo ulje
CO	0,17	0,035
NOx	0,013	0,084
SO <sub>2</sub>	0,0025	0,12
čestice	16	16

Ispuštanje ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) iz proizvodnih procesa koji uključuju izgaranje goriva bez izravnog kontakta produkata izgaranja sa sirovinom i iz procesa izgaranja goriva za dobivanje toplinske i/ili električne energije izračunava se pomoću faktora emisije; za kruta, tekuća i plinovita goriva prema izrazu:

$$E = F \cdot \frac{B \cdot H_d \cdot EF}{1000} \quad [\text{kgCO}_2 / \text{god}] \quad (3.2.)$$

gdje su:

- E ispuštanje CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>/god]
- B količina potrošenog goriva (kg/god za kruta i tekuća goriva; m<sup>3</sup>/god za plinovita goriva)
- F faktor oksidacije ugljika, tablica 3-11
- H<sub>d</sub> donja ogrjevna vrijednost goriva (kJ/kg za kruta i tekuća goriva; kJ/m<sup>3</sup> za plinovita goriva tablica 3-12)
- EF faktor emisije CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>/MJ], tablica 3-13.

Faktori oksidacije ugljika prikazani su u tablici 5-5.

Tablica 5-5: Faktori oksidacije ugljika [71]

Gorivo	Faktor oksidacije ugljika (F)
Kruta goriva	0,980
Tekuća goriva	0,990
Plinovita goriva	0,995

U tablici 5-6 prikazane su vrste goriva i približne donje ogrjevne vrijednosti.

Tablica 5-6: Vrste goriva i približne donje ogrjevne vrijednosti [72]

Šifra	Naziv goriva	Donja ogrjevna vrijednost	Jedinica
111	Ogrjevno drvo	7380 – 9000	kJ/kg
112	Drveni ugljen	33000	kJ/kg
203.01	<b>Ekstra lako loživo ulje</b>	<b>42710</b>	kJ/kg
203.02	Lako ili srednje loživo ulje	40300	kJ/kg
203.03	Teško loživo ulje	40190	kJ/kg
301	<b>Prirodni plin</b>	<b>33338</b>	kJ/m <sup>3</sup>
315	Gradski plin	22630	kJ/m <sup>3</sup>

U tablici 5-7 prikazani su faktori emisije CO<sub>2</sub> za pojedine vrste goriva.

Tablica 5-7: Faktori emisije CO<sub>2</sub> za pojedinu vrstu goriva [72]

Gorivo	Faktor emisije [kgCO <sub>2</sub> /MJ]
<b>Plinovita goriva</b>	
<b>Prirodni plin</b>	<b>0,0561</b>
Rafinerijski plin	0,667
Koksnii plin	0,0477
Plinovita biomasa	0,1122
<b>Tekuća goriva</b>	
Ukapljeni naftni plin	0,0631
<b>Lako i ekstra lako loživo ulje</b>	<b>0,0741</b>
Srednje i teško loživo ulje	0,0774
Otpadna ulja	0,0733
Sirova nafta	0,0733
Masti i ulja za podmazivanje	0,0733
Bitumen	0,0807
Tekuća biomasa	0,0733
<b>Kruta goriva</b>	
Antracit	0,0983
Kameni ugljen	0,0946
Mrki ugljen	0,0961
Lignit	0,1012
Koks	0,1082
Naftni koks	0,1008
Kruta biomasa (piljevina i briketi od piljevine; prirodno drvo svih oblika)	0,1096

Rezultati izračuna onečišćujućih tvari s asfaltnih baza COLAS Hrvatska d.d. prikazani su u tablici 5-8.

Tablica 5-8: Rezultati izračuna onečišćujućih tvari asfaltnih baza COLAS Hrvatska d.d. [55]

Asfaltna baza		Motičnjak	Lepoglava	Posedarje	Ploče
CO	kg/god	19443	19846	1424	3804
NOx	kg/god	1487	1518	3417	9131
SO <sub>2</sub>	kg/god	286	292	4882	13044
čestice	kg/god	1829966	1867899	650891	17739157
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>kg/god</b>	<b>1 573 878</b>	<b>1 501 055</b>	<b>1 049 422</b>	<b>2 696 779</b>
Prosječna vrijednost CO <sub>2</sub> po toni proizvedene asfaltnje mješavine	kg/t	13,76	12,86	25,80	24,81

Orijentacijski rezultati izračuna onečišćujućih tvari iz ukupne proizvodnje sa svih asfaltnih baza u Republici Hrvatskoj prikazani su u tablici 5-9.

Tablica 5-9: Orijentacijski rezultati izračuna onečišćujućih tvari iz ukupne proizvodnje sa svih asfaltnih baza u RH [55]

Godina		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
Gorivo		Plin (60%)	Lož ulje (40%)	Plin (60%)	Lož ulje (40%)	Plin (60%)	Lož ulje (40%)	Plin (60%)	Lož ulje (40%)	Plin (60%)	Lož ulje (40%)	Plin (60%)	Lož ulje (40%)
CO	t/god	437,6	60,1	329,5	45,2	221,3	30,4	260,1	35,7	255,0	35,0	281,5	38,6
NOx	t/god	33,5	144,1	25,2	108,5	16,9	72,9	19,9	85,7	19,5	84,0	21,5	92,7
SO <sub>2</sub>	t/god	6,4	205,9	4,8	155,0	3,3	104,2	3,8	122,4	3,8	120,0	4,1	132,5
čestice	t/god	41184,0	27456,0	31008,0	20672,0	20832,0	13888,0	24480,0	16320,0	24000,0	16000,0	26496,0	17664,0
CO <sub>2</sub>	t/god	34259	43420	25794	32691	17329	21963	20364	25809	19965	25303	22041	27934
		<b>77 679</b>		<b>58 485</b>		<b>39 292</b>		<b>46 173</b>		<b>45 268</b>		<b>49 975</b>	

Orijentacijski izračun iz tablice 5-9 izrađen je tako da se ukupna proizvodnja mješavina prvobitno pomnožila sa faktorom 0,6 (za plin) što označava da 60% proizvodnje je koristilo plin dok u drugom slučaju je faktor 0,4 (za lož ulje) što dakle označava da je 40% proizvodnje kao gorivo korišteno lož ulje.

Tablica 5-10: Orijentacijski udio CO<sub>2</sub> iz proizvodnje mješavina [55]

Godina		2008	2009	2010	2011	2012	2013
CO <sub>2</sub> Sa svih asfaltnih baza	t/god	77.679	58.485	39.292	46.173	45.268	49.975
CO <sub>2</sub> U Hrvatskoj <sup>2</sup>	t/god	31.050.000	29.058.000	28.598.000	-	-	-
Udio	%	0,25	0,20	0,14	-	-	-

U tablici 5-10 prikazani je udio proizvedenog CO<sub>2</sub> sa asfaltnih baza, samo korištene energije koju koristi bubanj za sušenje agregata, dakle bez ostalih potrošenih energija (grijanje bitumena, gorivo za dizel agregate) u Hrvatskoj prema proizvedenoj ukupnoj količini CO<sub>2</sub> u Hrvatskoj. Postotak od 0,14% do 0,25% izgleda mali, ali kada se to usporedi sa činjenicom da jedno prosječno drvo može u jednoj godini apsorbirati do 21,7 kg CO<sub>2</sub>, a do trenutka starosti od 40 godina može ukupno apsorbirati oko 1 t CO<sub>2</sub> [73], [74] tada vidimo da je potrebno više od 2 695 162 stabala godišnje koje bi apsorbirale CO<sub>2</sub> sa asfaltnih baza.

Prema inventaru stakleničkih plinova na području Hrvatske iz 2012. godine, nije posebno iskazana vrijednost emisija stakleničkih plinova za asfaltne mješavine. Upravo zbog toga što nije posebno iskazana vrijednost emisija stakleničkih plinova dana je preporuka za poboljšanje da se prikupi više informacija o vrsti mješavina i korištenim otapalima [75].

---

<sup>2</sup> Podaci količina CO<sub>2</sub> za Hrvatsku nisu objavljeni za 2011, 2012 i 2013 godinu, dok su za prijašnje godine preuzeti iz literature [75].

## 6. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

### 6.1. Metodologija istraživanja

U okviru rada provedena su ispitivanja za potrebe utvrđivanja gubitka vlažnosti različitih frakcija agregata od ukupne vlažnosti frakcije koje se koriste kao sirovina u proizvodnji asfaltnih mješavina. Određivanje vlažnosti materijala definirano je normom HRN EN 1097-5:2008 *Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilirajućem sušioniku* [76] prema kojoj se sadržaj vode određuje sušenjem kamenih materijala na kontroliranoj temperaturi od 110°C u trajanju od 24 sata i mogućnošću sušenja do „konstantne mase“, a što označava promjenu mase u vremenu od jednog sata koja se ne razlikuje za više od 0,1%.

Sušenje je tehnološka operacija kojom se dio vode iz krute tvari uklanja ishlaplivanjem. Voda s površine tvari ishlapljuje čime se smanjuje vlažnost površine tvari i radi nastale koncentracije, voda difundira iz unutrašnjosti prema površini tvari. Koliko vode u jedinici vremena ishlapi s površine tvari ovisi uglavnom o stanju i brzini strujanja zraka nad površinom i obliku veze između tvari i vode. Za difuziju vode prema površini tvari odlučna je struktura tvari, kapilarne pojave i brzina difuzije pare.

Budući da je voda u krutoj tvari vezana kapilarnim silama, tlak vodene pare iznad krute tvari je manji nego tlak vodene pare nad površinom vode kod iste temperature. Vodu se u krutoj tvari dijeli na slobodnu i vezanu vlagu. Pod pojmom slobodne vlage podrazumijeva se voda koja ima beznačajno mali tlak vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temperature. Pojam vezane vlage označava voda koja ima mali tlak vodene pare u odnosu na tlak pare nad površinom vode kod iste temperature. Tako da se teško može povući oštra linija granice između slobodne i vezane vlage. Kod sušenja prvo ishlapi voda iz krupnijih, a zatim iz sitnijih kapilara.

Strujanje vode iz unutrašnjosti prema površini tvari nastaje na tri načina:

- uslijed kapilarnog efekta,
- difuzijom vodene pare kroz šire kapilare,
- kapilarnom kondenzacijom.

Kapilarna se kondenzacija sastoji u tome da voda u nekom mjestu u tvari ishlapi, zatim kroz kapilaru difundira da bi ponovo kondenzirala u nekom užem dijelu kapilare ili na mjestu niže temperature [76], [77].

Količina vlažnosti odstranjena sušenjem (u postotku ukupne mase) iznosi:

$$w = \frac{m - m_{SM}}{m} \cdot 100 [\%] \quad (6.1.)$$

gdje su:

- w      vlažnost materijala, [%]  
m      masa vlažnog materijala, [kg]  
m<sub>SM</sub>    masa suhog materijala, [kg].

## 6.2. Laboratorijska oprema i resursi

Za potrebe istraživanja gubitka vlažnosti kamenog materijala izrađen je laboratorijski model trakaste sušare (komora s poklopcem). Ispitivanje umanjene vlažnosti provedeno je u prostorijama laboratorija Motičnjak (Varaždin), tvrtke COLAS Hrvatska d.d. Za provedbu ispitivanja korištena je sljedeća osnovna oprema:

- *laboratorijski model sušare* (komora s poklopcem izrađen je od pleksiglasa dimenzija 40 x 50 x 60 cm, jedna strana je s vratima na koju se stavljaju uzorci, na vrhu je otvor promjera 6,5 cm na koji se spaja uređaj za sušenje)
- *uređaj za sušenje* kojim se može kontrolirati temperatura i brzina strujanja zraka (mogućnost područja djelovanja brzine strujanja zraka je od 3,86 m/s do 6,32 m/s i temperature raspona od 33°C do 110°C)
- *štoperica* (mogućnost djelovanja od 0 s do 86400 s)
- *ventilirajući sušionik* (raspon temperature od 20°C do 200°C)
- *vaga*.

## 6.3. Uzorkovanje i priprema uzoraka

Uzorci kamenih materijala uzorkovani su na nenatkrivenoj deponiji asfaltne baze Motičnjak, tvrtke COLAS Hrvatska d.d. (*slika 6-1*). Uzorkovani su kameni materijali su veličina frakcija 0/2, 2/4, 4/8 i 8/11. Porijeklo kamenog agregata je iz kamenoloma Špica i Hruškovec tvrtke Kaming d.d. Uzorkovan je i reciklažni asfaltni agregat 0/11 RA. Reciklažni asfaltni agregat uzorkovan je na natkrivenoj deponiji asfaltne baze Lepoglava, tvrtke COLAS Hrvatska d.d. (*slika 6-2*). Svi agregati uzorkovani su u istom danu.



*Slika 6-1: Deponije kamenih materijala (asfaltna baza Motičnjak, COLAS Hrvatska d.d.)*

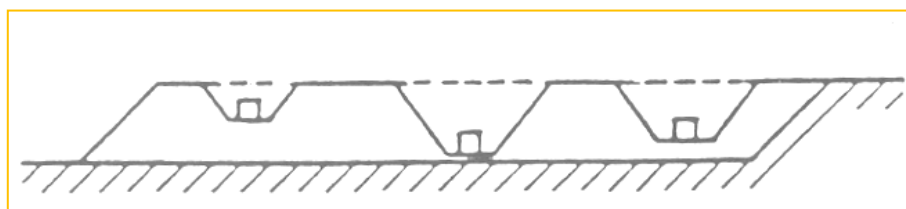


*Slika 6-2: Deponija reciklažnog asfaltnog agregata (asfaltna baza Lepoglava, COLAS Hrvatska d.d.)*

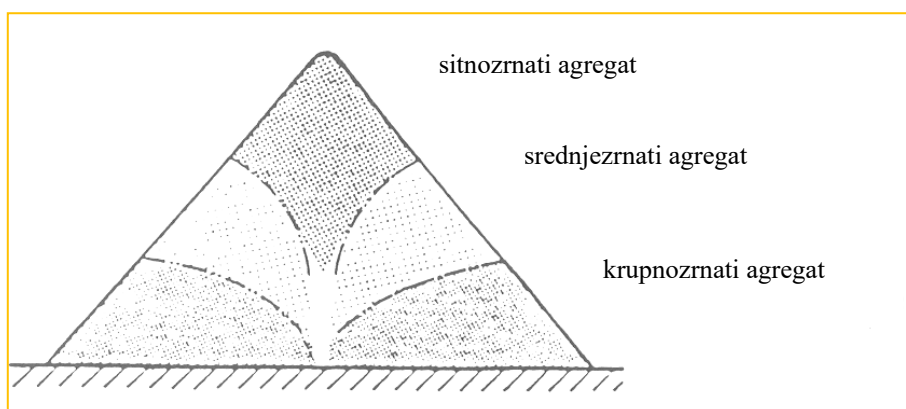
Pojedinačni uzorci pojedinih frakcija kamenog agregata, približno iste mase, uzeti su s različitih mjesta na različitim dubinama, raspoređenih preko cijele deponije. Prilikom odabira mjesta i broja pojedinačnih uzoraka uzet je u obzir način formiranja deponije, njezin oblik i mogućnost segregacije. Pojedinačni uzorci uzeti su korištenjem lopate na najnižoj točki pojedine rupe. Agregat na deponiji teži segregaciji, stoga je bolje, gdje je to moguće, uzorkovati iz unutrašnjosti deponije, odnosno ne uzimati pojedinačne uzorke blizu površine. Osobito se to odnosi na krupnozrnate agregate. Kako bi dobili površinu uzorkovanja iz unutrašnjosti deponije



koristi se utovarivač. Određenim brojem ovakvih zahvata izradi se deponija za uzorkovanje; tada se pojedinačni uzorci uzorkuju lopatom sa slučajno odabranih mjesta preko cijele nove deponije prema HRN EN 932-1:2003 *Ispitivanje općih svojstava agregata – 1. dio: Metode uzorkovanja* [78].



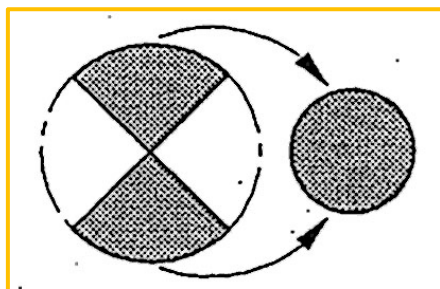
Slika 6-3: Prikaz načina uzorkovanja s deponije [78]



Slika 6-4: Shematski prikaz dijelova deponija oblika stošca uslijed segregacije agregata [78]

Uzorci frakcija kamenih materijala uzorkovani na deponiji asfaltne baze dopremljeni su u laboratorij s prirodnom vlažnošću koja je bila u trenutku uzorkovanja.

Kod smanjivanja uzoraka metodom četvrtanja, laboratorijski uzorak se postavi na radnu površinu. Uzorak se temeljito promiješa i izrađuje se prvi stožac, te se iz prvog stošca izrađuje drugi stožac. Ovaj postupak se ponavlja tri puta. Prilikom izrade stožaca, sadržaj lopate se istrese na vrh stošca da se agregat raspe po svim stranama stošca i jednoliko rasporedi kako bi se različite veličine zrna dobro promiješale. Treći stožac se spljošti višekratnim ubadanjem lopate okomito u vrh stošca, tako da se izradi plosnata hrpa jednolikog promjera i debljine. Zaravnata hrpa se četvrta s dvije međusobno okomite linije. Par dviju nasuprotnih četvrtina se odbaci i lopatom oblikuje hrpa od dviju preostalih četvrtina (HRN EN 932-2:2003) [79].



*Slika 6-5: Shematski prikaz četvrtanja agregata [79]*

Postupak miješanja i četvrtanja se ponavlja dok se ne dobije potrebna veličina ispitnog uzorka.

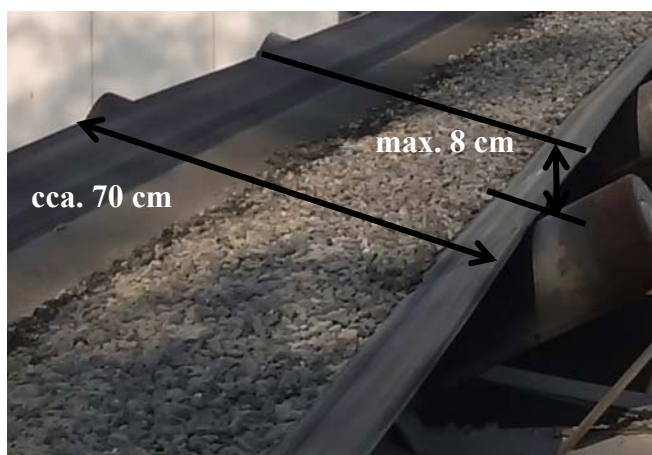


*Slika 6-6: Homogenizirani i pripremljeni uzorak za ispitivanje*

Nakon pripreme i homogeniziranja laboratorijskih uzorka (*slika 6-6*) uslijedilo je ispitivanje.

### 6.3.1. Određivanje veličine i mase ispitnih uzoraka

Masa ispitnih uzoraka odabrana je temeljem realnih prolaza masa materijala kosom trakom. Na slici 6-7 prikazane su dimenzije beskonačne kose trake kojom se kameni materijal doprema u rotacijski bubanj.



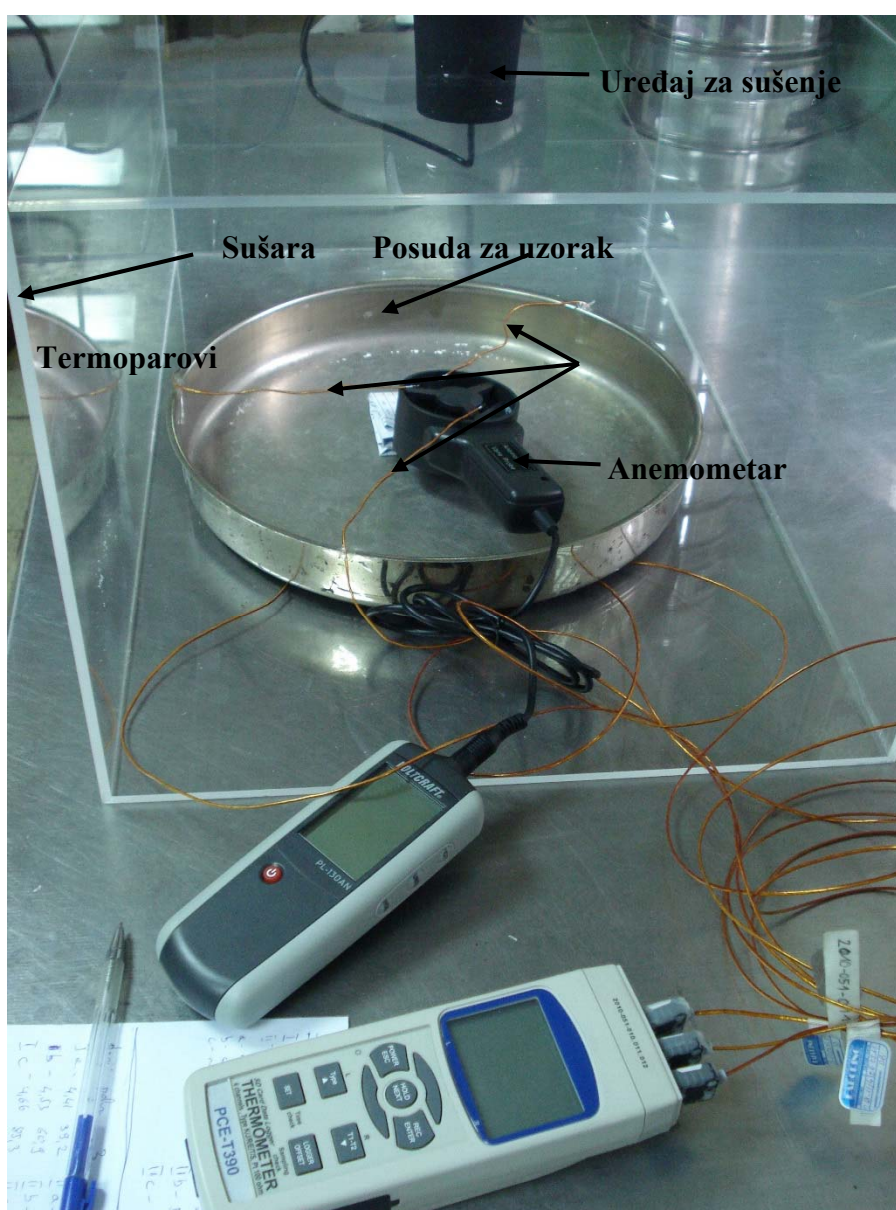
Slika 6-7: Dimenzije kose trake s materijalom (izvorno autorsko)

Širina kose trake iznosi 0,7 m, dok maksimalna dubina je 0,08 m. Kod maksimalni kapaciteta rada asfaltna baza opterećenje trake materijalom je u širini od oko 0,5 m i debljini od 0,06 m. Za proračun veličine uzoraka uzete su prosječne vrijednosti širine trake od 0,5 m i prosječne debljine nasutog sloja frakcija kamenih materijala od 0,03 m. Površina sloja na 1 metar dužni iznosi  $0,5 \text{ m}^2$ . Volumen sloja je tada  $0,015 \text{ m}^3$ . Nasipna gustoća frakcije kamenog materijala veličine 0/4 mm iznosi oko  $1,7 \text{ t/m}^3$ . Dobiva se 25,5 kg frakcije 0/4. Nasipna gustoća frakcije kamenog materijala veličine 4/8 mm iznosi oko  $1,4 \text{ t/m}^3$ , što daje masu od 21,0 kg, a isto tako se može preuzeti i masa za frakciju 8/11. Temeljem postavljenog recepta za miješanje asfaltna mješavine koji je kod klasičnog habajućeg sloja AC 11 surf u omjeru frakcija 0/4 – 40% i 4/8 te 8/11 svaki od po 30%. Stoga na  $1 \text{ m}^2$  dolazi oko 45,6 kg kamenih frakcija.

Laboratorijski uzorak u posudi je veličine  $0,1 \times 0,1 \times 0,03 \text{ m}$  stoga se može zaključiti da će laboratorijski uzorak imati volumen od  $0,003 \text{ m}^3$ , odnosno 510 g. Uzorci koji se u receptu za miješanje asfaltna mješavine pojavljuju u manjem postotku su smanjeni na 400 g. Laboratorijski ispitni uzorci debljine su 3 cm.

## 6.4. Ispitivanje sušenjem

Uzorci su postavljeni su u laboratorijski model sušare na koji je spojen uređaj za sušenje (slika 6-8). Konceptija uređaja za sušenje je takva da se mogu kontrolirati dvije osnovne temperature i tri osnovne brzine strujanja zraka. Ostale kombinacije mogu se dobiti sa već spomenutim uvjetima i visinom rasprostiranja utjecajnih djelovanja na promatranu površinu. Na slici 6-8 prikazani su i dijelovi opreme za određivanje ulaznih parametara laboratorijskog modela sušare.



Slika 6-8: Određivanje ulaznih parametara laboratorijskog modela sušare (izvorno autorsko)

Kod pripreme ispitne opreme utvrđeni su sljedeći rasponi ulaznih parametara temperatura i brzina strujanja zraka te vremena opterećenja uzoraka strujanju vrućeg zraka (*tablica 6-1*). Shema ispitivanja prikazana je na *slici 6-12*.

*Tablica 6-1: Ulazni parametri laboratorijske komore*

Brzina strujanja, v	m/s	3,86			4,53			5,94		
Temperatura, T	°C	33,1	50,4	71,7	39,2	60,9	85,3	37,8	64,3	94,0
Vrijeme izloženosti, t	s	30	45	60	30	45	60	30	45	60

Ispitivanje je provedeno u sljedećim koracima:

1. Pojedinačnom uzorku kamenog materijala određene frakcije s prirodnom vlažnošću određena je masa prije ispitivanja vaganjem (*slika 6-9*).



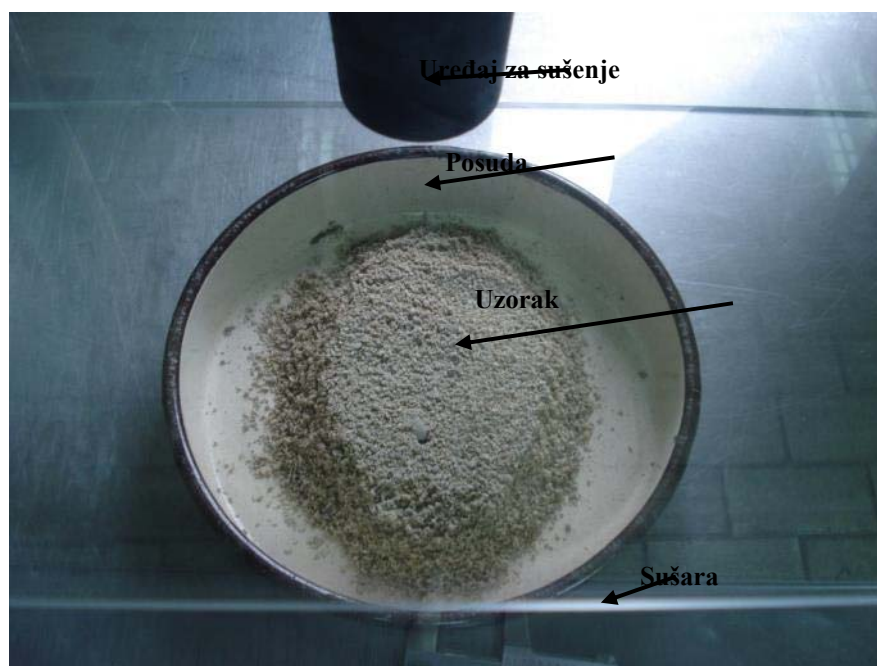
*Slika 6-9: Određivanje mase uzorka prije ispitivanja vaganjem*

2. Nakon vaganja uzorak je postavljen u laboratorijski model sušare (*slika 6-10*).



*Slika 6-10: Uzorak u komori*

3. Na poklopac komore spojen je uređaj za sušenje podešen na određenu brzinu strujanja zraka i temperaturu. Opterećenje uzorka temperaturom i brzinom strujanja zraka traje 30 sekundi (*slika 6-11*).

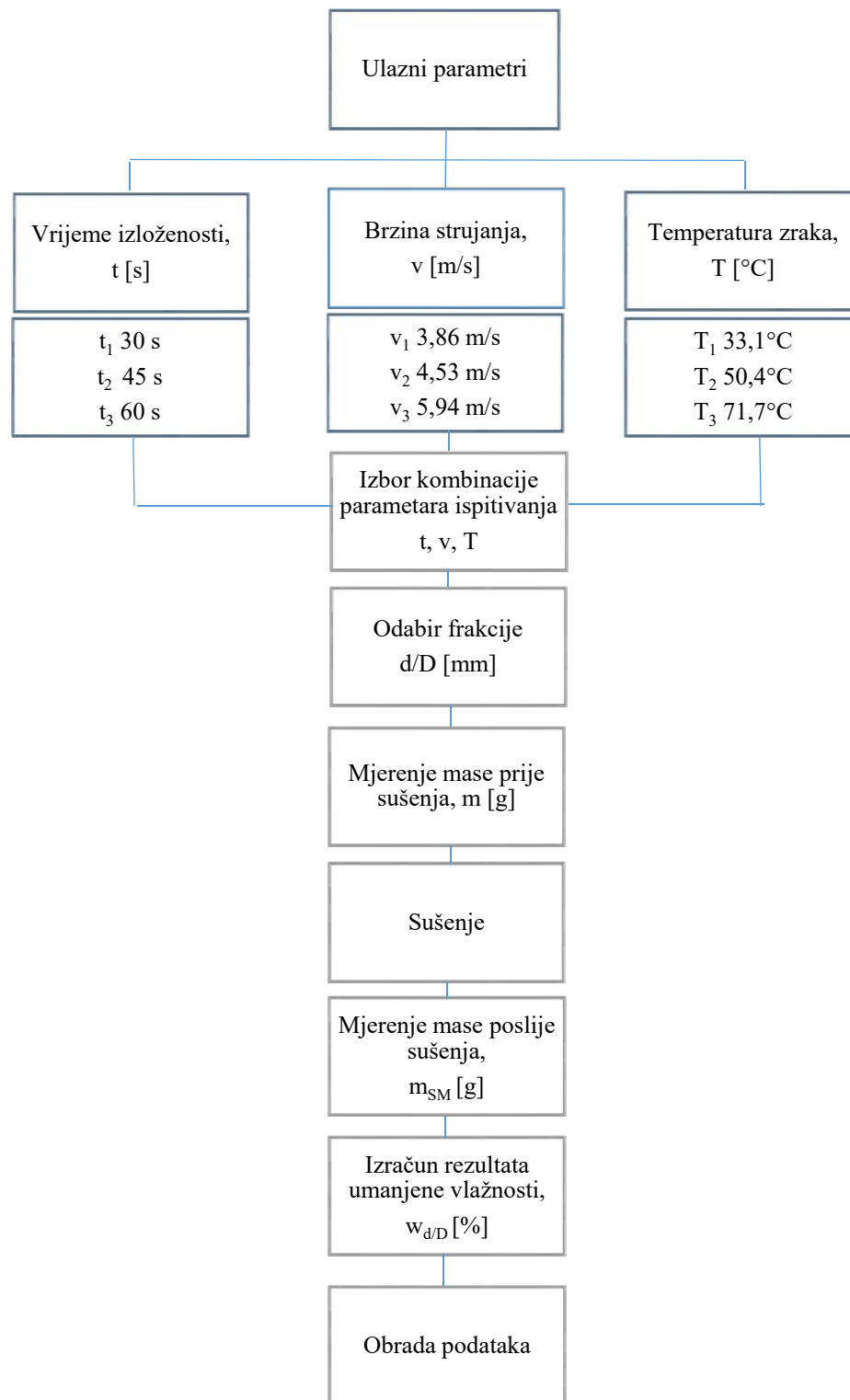


*Slika 6-11: Namještanje parametara i ispitivanje*

4. Nakon isteka vremena uređaj se isključuje, uzorak se stavlja na vagu te se očitava masa i zapisuje.

5. Uzima se sljedeći uzorak iste frakcije, određuje se masa prije vaganja, ispituje se pod istim uvjetima brzine strujanja zraka i pripadne temperature ali vrijeme ispitivanja je 45 sekundi, te nakon toga se ponovno određuje masa uzorka.
6. Potom se uzima sljedeći uzorak iste frakcije, ispituje se pod istim uvjetima brzine strujanja zraka i pripadne temperature, ali vrijeme ispitivanja je 60 sekundi.

Kod većih brzina strujanja zraka i veličine čestica frakcija 0/2 ili 0/4 koje su ispitivane dolazi do podizanja čestica kamenog brašna unutar frakcije 0/2 ili 0/4, a ujedno i dakle gubitka njihove mase što je neprihvatljivo. Kod ispitivanja umanjene vlažnosti frakcija bitna je masa, tako da gubitak čestica u procesu nije dopušten.



Slika 6-12: Shema ispitivanja



Ukupno su pripremljena i ispitana 162 uzorka agregata, a ispitani uzorci s parametrima ispitivanja prikazani su u *tablici 6-2*.

Tablica 6-2: Ispitani uzorci s odabranim parametrima

				Frakcija kamenog materijala, mm					
				0/2 d/D (3,07%)	0/2 d/D (5,80%)	2/4 d/D (3,31%)	4/8 d/D (2,10%)	8/11 d/D (0,92%)	RA 0/11 d/D (5,09%)
Brzina, <i>v</i>	3,86 m/s	Temperatura 33,1°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 50,4°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 71,7°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
Brzina, <i>v</i>	4,53	Temperatura 39,2°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 60,9°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 85,3°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
Brzina, <i>v</i>	5,94	Temperatura 37,8°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 64,3°C, <i>T</i>	Vrijeme 30s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
		Temperatura 94,0°C, <i>T</i>	Vrijeme 30 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 45 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+
			Vrijeme 60 s, <i>t</i>	+	+	+	+	+	+

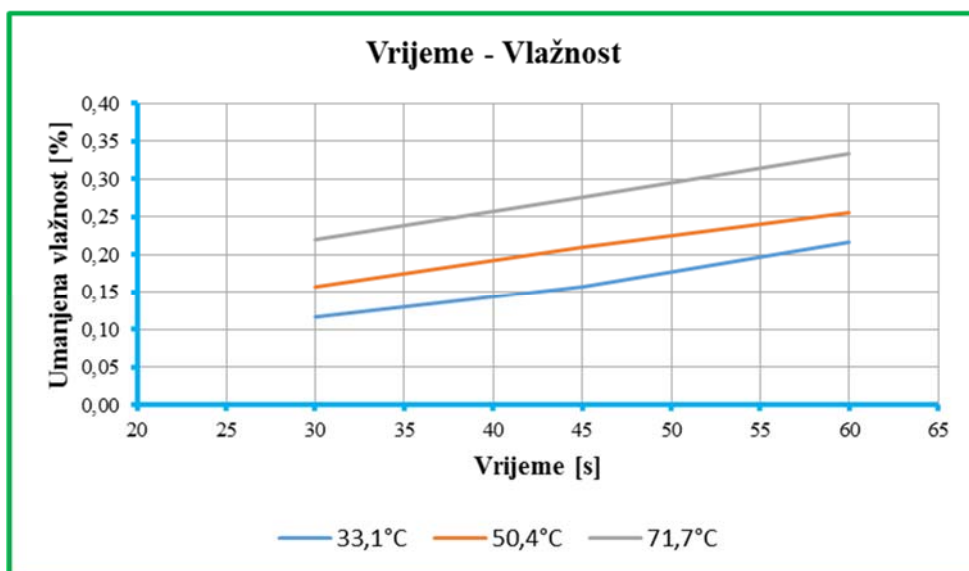
## 6.5. Rezultati ispitivanja

Prema opisanom modelu ispitivanja dobiveni su sljedeći rezultati ispitivanja. Deklarirana gustoća frakcije određena prema HRN EN 1097-6:2013 [80] 0/2 Špica iznosi 2,73 Mg/m<sup>3</sup>, a upijanje vode određeno prema HRN EN 1097-6:2013 [80] iznosi 0,8%. Rezultati ispitivanja umanjene vlažnosti za frakciju 0/2 prikazani su u *tablici 6-3*.

*Tablica 6-3: Rezultati ispitivanja frakcije 0/2 Špica*

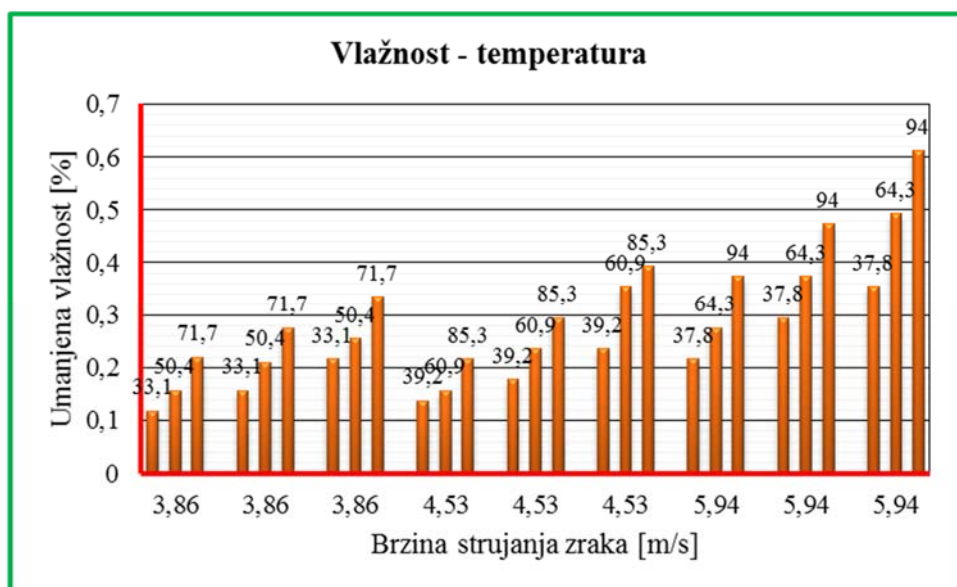
<b>Frakcija 0/2 Špica, prirodna vlaga 3,07%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,12
3,86	33,1	45	0,16
3,86	33,1	60	0,22
3,86	50,4	30	0,16
3,86	50,4	45	0,21
3,86	50,4	60	0,26
3,86	71,7	30	0,22
3,86	71,7	45	0,28
3,86	71,7	60	0,33
4,53	39,2	30	0,14
4,53	39,2	45	0,18
4,53	39,2	60	0,24
4,53	60,9	30	0,16
4,53	60,9	45	0,24
4,53	60,9	60	0,35
4,53	85,3	30	0,22
4,53	85,3	45	0,29
4,53	85,3	60	0,39
5,94	37,8	30	0,22
5,94	37,8	45	0,29
5,94	37,8	60	0,35
5,94	64,3	30	0,28
5,94	64,3	45	0,37
5,94	64,3	60	0,49
5,94	94,0	30	0,37
5,94	94,0	45	0,47
5,94	94,0	60	0,61

Slika 6-13 daje grafički prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjnja vlažnosti pri istoj temperaturi. Vidljivo određeno ponašanje umanjnja vlažnosti s povećanjem temperature.



Slika 6-13: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/2 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86 m/s

Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.

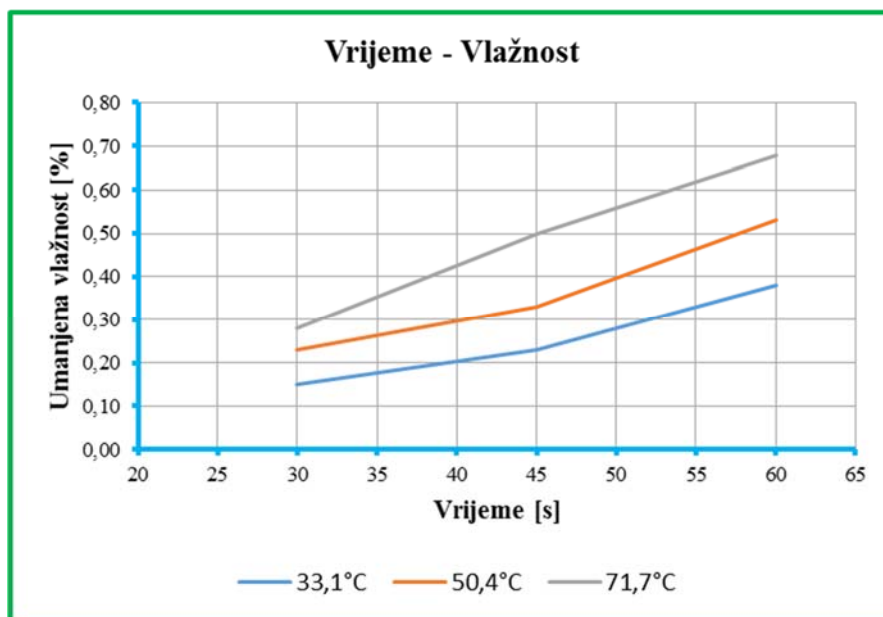


Slika 6-14: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/2 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

Tablica 6-4: Rezultati ispitivanja frakcije 0/2 Špica s povećanom vlažnosti

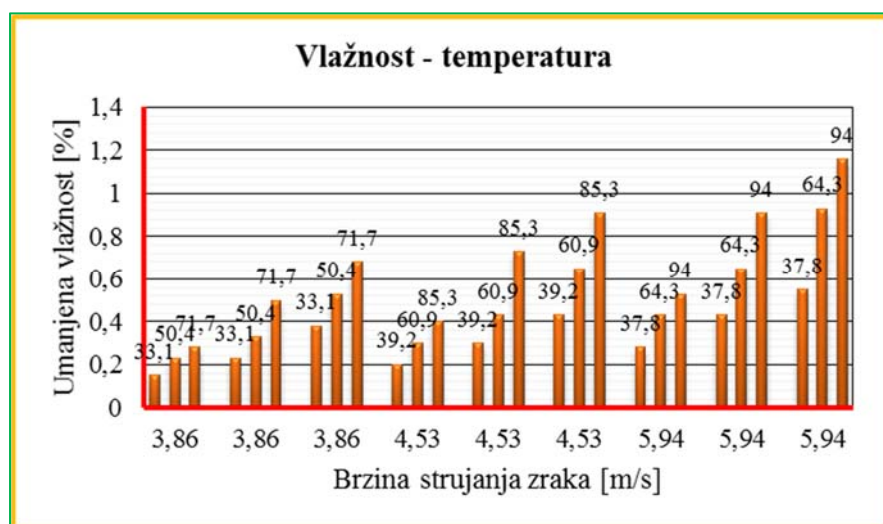
<b>Frakcija 0/2 Špica, prirodna vlaga 5,80%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,15
3,86	33,1	45	0,23
3,86	33,1	60	0,38
3,86	50,4	30	0,23
3,86	50,4	45	0,33
3,86	50,4	60	0,53
3,86	71,7	30	0,28
3,86	71,7	45	0,50
3,86	71,7	60	0,68
4,53	39,2	30	0,20
4,53	39,2	45	0,30
4,53	39,2	60	0,43
4,53	60,9	30	0,30
4,53	60,9	45	0,43
4,53	60,9	60	0,65
4,53	85,3	30	0,40
4,53	85,3	45	0,73
4,53	85,3	60	0,91
5,94	37,8	30	0,28
5,94	37,8	45	0,43
5,94	37,8	60	0,55
5,94	64,3	30	0,43
5,94	64,3	45	0,65
5,94	64,3	60	0,93
5,94	94,0	30	0,53
5,94	94,0	45	0,91
5,94	94,0	60	1,16

Na slici 6-15 dan je grafički prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjavanja vlažnosti pri istoj temperaturi. Također je vidljivo određeno ponašanje umanjavanja vlažnosti s povećanjem temperature.



Slika 6-15: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/2 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s

Slika 6-16 izrađena je temeljem tablice 6-4. Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.



Slika 6-16: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/2 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

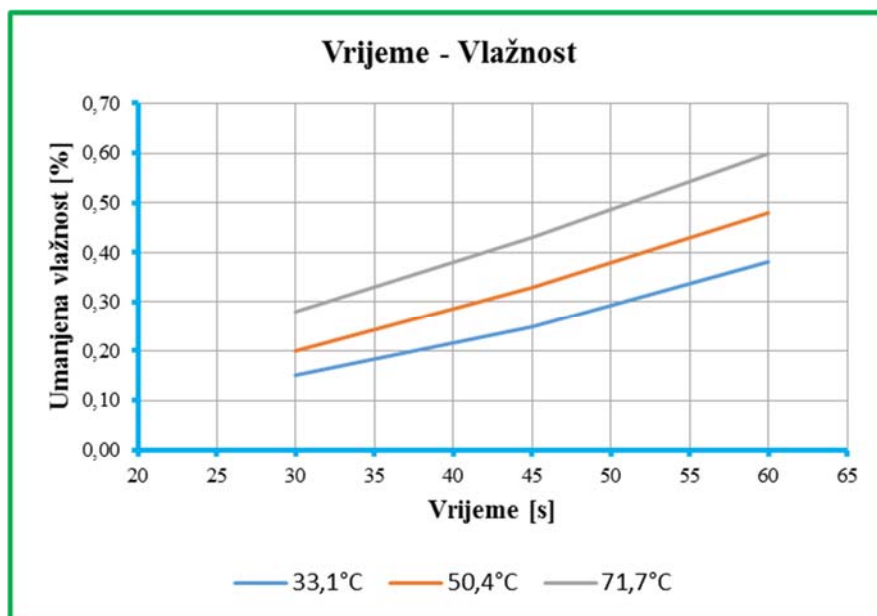
Uspoređujući vrijednosti iz tablica 6-3 i 6-4 kod frakcije 0/2, može se zaključiti da je ulazna vlažnost materijala veća pri istim uvjetima ispitivanja, umanjena vlažnost će linearno biti veća. To povećano smanjenje pripisano je slobodnoj vodi koja se nalazi oko zrna kamena.

Deklarirana gustoća frakcije HRN EN 1097-6:2013 [80] 2/4 Hruškovec iznosi 2,88 Mg/m<sup>3</sup>, a upijanje vode HRN EN 1097-6:2013 [80] je 1,3%.

Tablica 6-5: Rezultati ispitivanja frakcije 2/4 Hruškovec

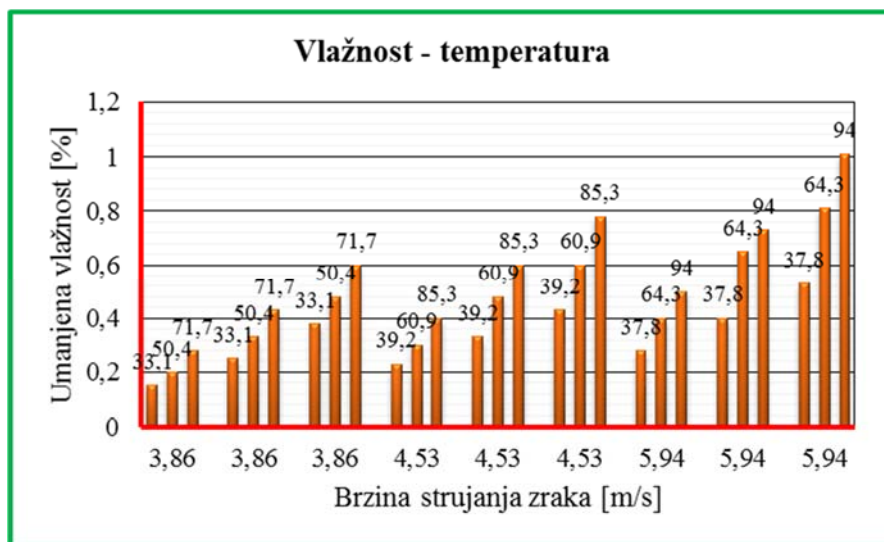
<b>Frakcija 2/4 Hruškovec, prirodna vlaga 3,31%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,15
3,86	33,1	45	0,25
3,86	33,1	60	0,38
3,86	50,4	30	0,20
3,86	50,4	45	0,33
3,86	50,4	60	0,48
3,86	71,7	30	0,28
3,86	71,7	45	0,43
3,86	71,7	60	0,60
4,53	39,2	30	0,23
4,53	39,2	45	0,33
4,53	39,2	60	0,43
4,53	60,9	30	0,30
4,53	60,9	45	0,48
4,53	60,9	60	0,60
4,53	85,3	30	0,40
4,53	85,3	45	0,60
4,53	85,3	60	0,78
5,94	37,8	30	0,28
5,94	37,8	45	0,40
5,94	37,8	60	0,53
5,94	64,3	30	0,40
5,94	64,3	45	0,65
5,94	64,3	60	0,81
5,94	94,0	30	0,50
5,94	94,0	45	0,73
5,94	94,0	60	1,01

Na slici 6-17 nalazi se grafički prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjnja vlažnosti pri istoj temperaturi. Također je vidljivo određeno ponašanje umanjnja vlažnosti s povećanjem temperature.



Slika 6-17: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 2/4 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s

Prikaz slike 6-18 izrađen je temeljem tablice 6-5. Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.



Slika 6-18: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 2/4 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

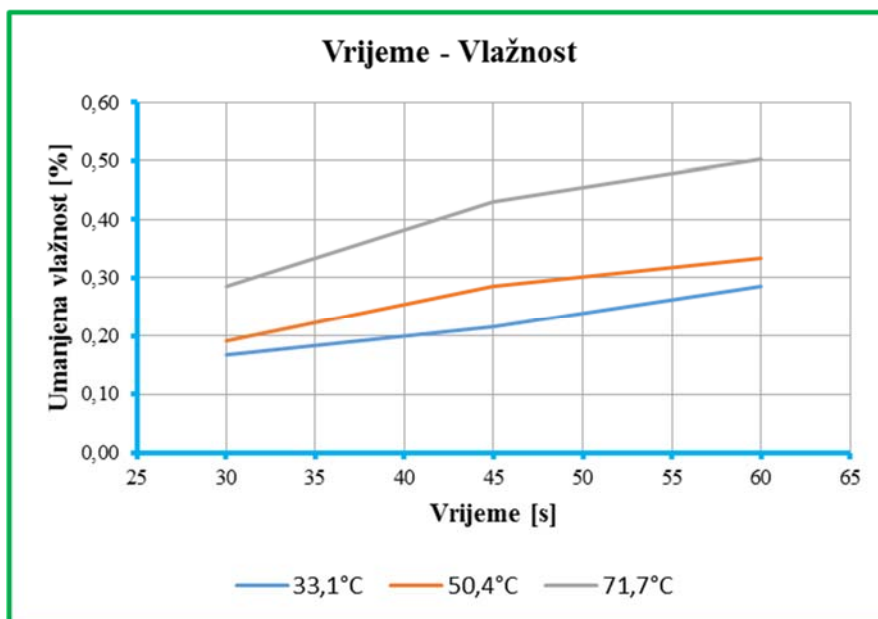
Deklarirana gustoća frakcije HRN EN 1097-6:2013 [80] 4/8 Špica iznosi 2,73 Mg/m<sup>3</sup> a upijanje vode prema HRN EN 1097-6:2013 [80] je 0,6%.

Tablica 6-6: Rezultati ispitivanja frakcije 4/8 Špica

<b>Frakcija 4/8 Špica, prirodna vlaga 2,1%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,17
3,86	33,1	45	0,21
3,86	33,1	60	0,29
3,86	50,4	30	0,19
3,86	50,4	45	0,29
3,86	50,4	60	0,33
3,86	71,7	30	0,29
3,86	71,7	45	0,43
3,86	71,7	60	0,50
4,53	39,2	30	0,26
4,53	39,2	45	0,33
4,53	39,2	60	0,38
4,53	60,9	30	0,29
4,53	60,9	45	0,38
4,53	60,9	60	0,50
4,53	85,3	30	0,38
4,53	85,3	45	0,48
4,53	85,3	60	0,62
5,94	37,8	30	0,31
5,94	37,8	45	0,36
5,94	37,8	60	0,41
5,94	64,3	30	0,33
5,94	64,3	45	0,48
5,94	64,3	60	0,60
5,94	94,0	30	0,38
5,94	94,0	45	0,57
5,94	94,0	60	0,60

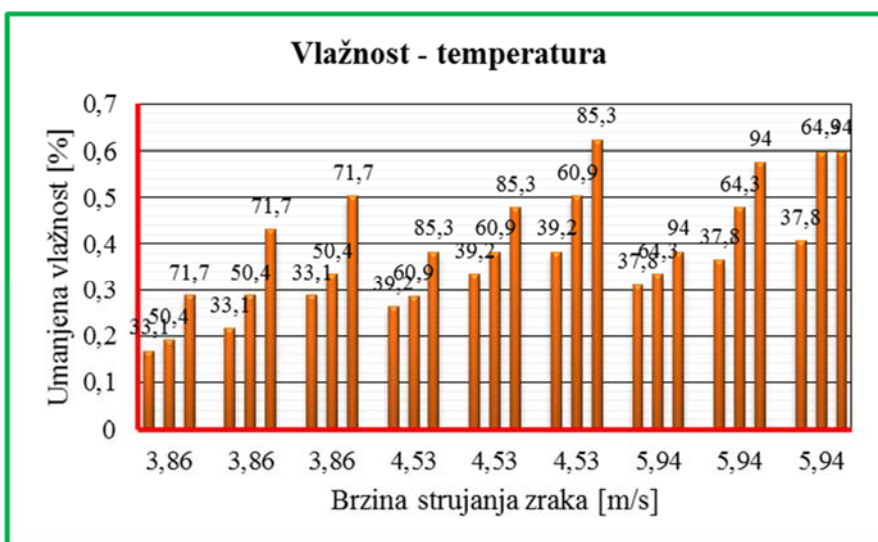
Slika 6-19 daje grafički prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjavanja vlažnosti pri istoj temperaturi. Također je vidljivo određeno ponašanje umanjavanja vlažnosti s povećanjem temperature.





Slika 6-19: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 4/8 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s

Prikaz slike 6-20 dan je temeljem tablice 6-6. Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.



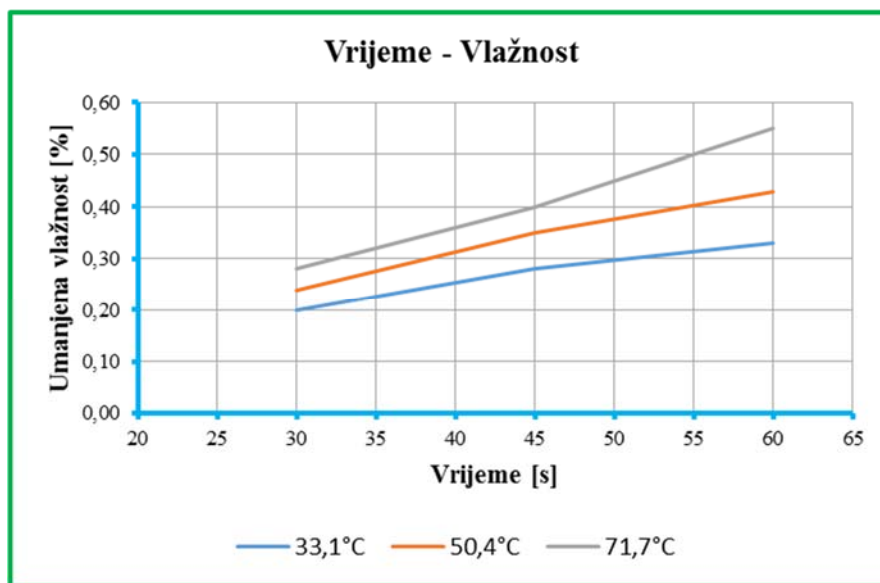
Slika 6-20: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 4/8 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

Deklarirana gustoća frakcije HRN EN 1097-6:2013 [80] 8/11 Špica iznosi 2,73 Mg/m<sup>3</sup> a upijanje vode HRN EN 1097-6:2013 [80] je 0,6%.

Tablica 6-7: Rezultati ispitivanja frakcije 8/11 Špica

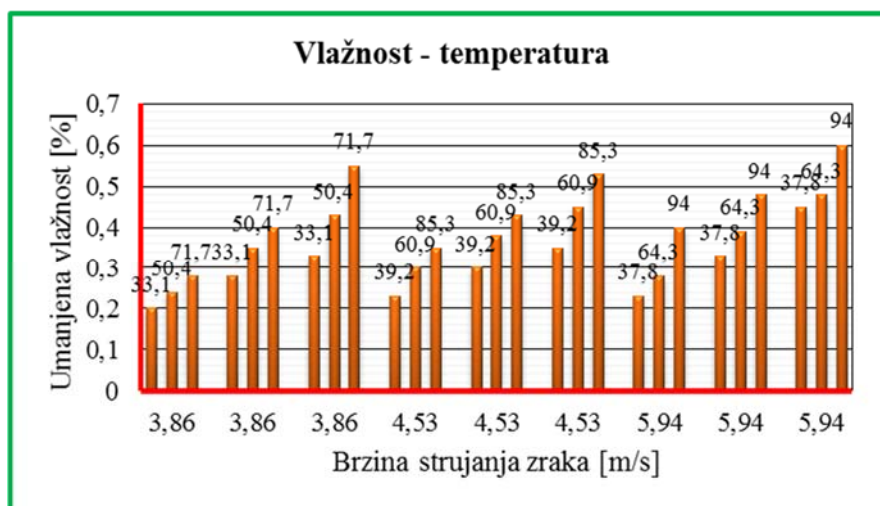
<b>Frakcija 8/11 Špica, prirodna vlaga 1,03%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,20
3,86	33,1	45	0,28
3,86	33,1	60	0,33
3,86	50,4	30	0,24
3,86	50,4	45	0,35
3,86	50,4	60	0,43
3,86	71,7	30	0,28
3,86	71,7	45	0,40
3,86	71,7	60	0,55
4,53	39,2	30	0,23
4,53	39,2	45	0,30
4,53	39,2	60	0,35
4,53	60,9	30	0,30
4,53	60,9	45	0,38
4,53	60,9	60	0,45
4,53	85,3	30	0,35
4,53	85,3	45	0,43
4,53	85,3	60	0,53
5,94	37,8	30	0,23
5,94	37,8	45	0,33
5,94	37,8	60	0,45
5,94	64,3	30	0,28
5,94	64,3	45	0,39
5,94	64,3	60	0,48
5,94	94,0	30	0,40
5,94	94,0	45	0,48
5,94	94,0	60	0,60

Na slici 6-21 dan je grafički prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjavanja vlažnosti pri istoj temperaturi. Također je vidljivo određeno ponašanje umanjavanja vlažnosti s povećanjem temperature.



Slika 6-21: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 8/11 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s

Prikaz slike 6-22 dan je temeljem tablice 6-7. Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.



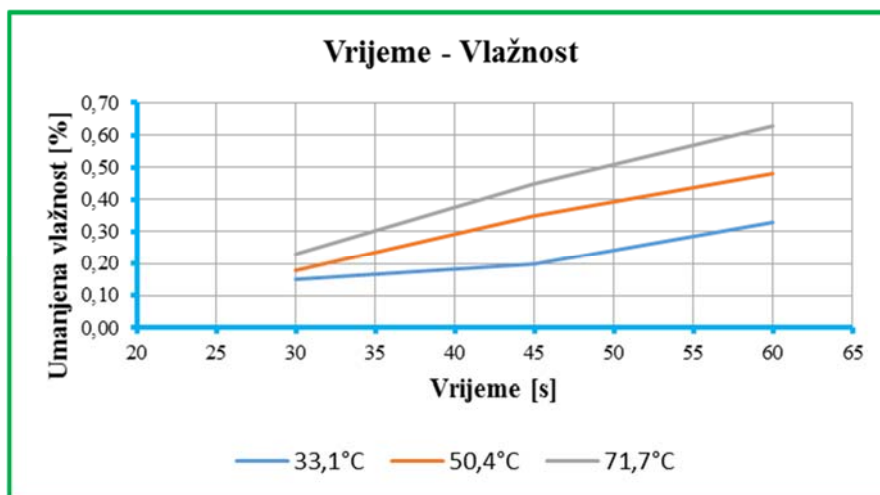
Slika 6-22: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 8/11 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

S obzirom na sve veću upotrebu reciklažnog asfaltnog agregata (RA) u proizvodnji asfaltnih mješavina, ispitan je i uzorak tog materijala, a rezultati ispitivanja dani su u *tablici 6-8*.

*Tablica 6-8: Rezultati ispitivanja frakcije 0/11 reciklažni asfaltni agregat*

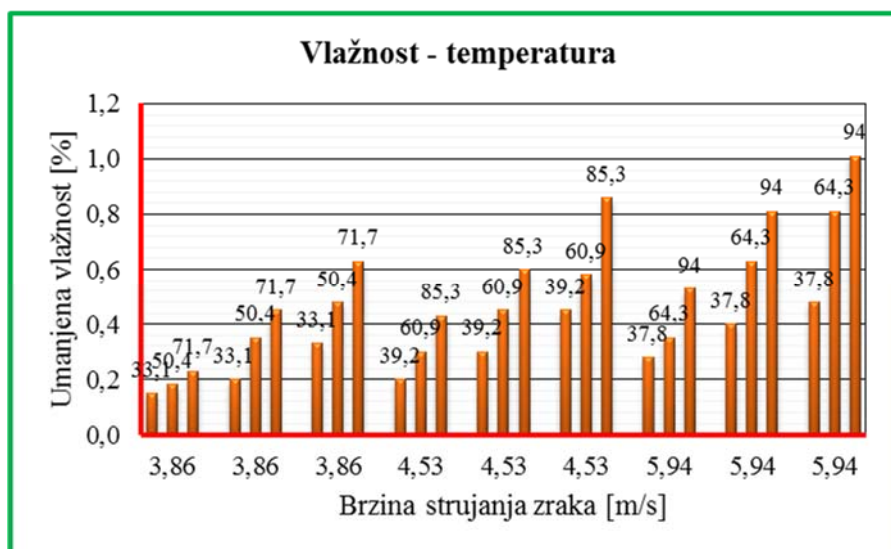
<b>Frakcija 0/11 RA, prirodna vlaga 5,09%</b>			
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Rezultat umanjene vlažnosti
m/s	°C	s	%
3,86	33,1	30	0,15
3,86	33,1	45	0,20
3,86	33,1	60	0,33
3,86	50,4	30	0,18
3,86	50,4	45	0,35
3,86	50,4	60	0,48
3,86	71,7	30	0,23
3,86	71,7	45	0,45
3,86	71,7	60	0,63
4,53	39,2	30	0,20
4,53	39,2	45	0,30
4,53	39,2	60	0,45
4,53	60,9	30	0,30
4,53	60,9	45	0,45
4,53	60,9	60	0,58
4,53	85,3	30	0,43
4,53	85,3	45	0,60
4,53	85,3	60	0,86
5,94	37,8	30	0,28
5,94	37,8	45	0,40
5,94	37,8	60	0,48
5,94	64,3	30	0,35
5,94	64,3	45	0,63
5,94	64,3	60	0,81
5,94	94,0	30	0,53
5,94	94,0	45	0,81
5,94	94,0	60	1,01

Na *slici 6-23* grafički je prikaz mjerenja umanjene vlažnosti s vremenom. S vremenom vidljiv je rastući trend umanjavanja vlažnosti pri istoj temperaturi. Vidljivo određeno ponašanje umanjavanja vlažnosti s povećanjem temperature.



Slika 6-23: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 s pripadajućim temperaturama kod brzine 3,86m/s

Prikaz slike 6-24 dan je temeljem tablice 6-8. Pri različitim brzinama strujanja zraka pod istim vremenskim tijekom (30 s, 45 s i 60 s) i prikazanim temperaturama vidljiv je trend povećanja umanjene vlažnosti.



Slika 6-24: Dijagram vlažnost-temperatura frakcije 0/11 s pripadajućim vremenima od 30 s, 45 s i 60 s

## 6.6. Postupak smanjenja vlažnosti tijekom vremena

Obavljeno je ispitivanje vlažnosti agregata u uređaju za ispitivanje udjela vlage koja se koristi kod ispitivanja emulzija. Uređaj ima osjetljivu vagu rezolucije od 0,001 g. Uređaj se sastoji od spiralnog grijača na poklopcu uređaja i pripadajuće vage koja je smještena na dnu. Pripremljeni uzorak koji je ispitan je veličine 40 g iz razloga osjetljivosti vage čija je nosivost do 50 g. Uređaj nije opremljen s mogućnošću strujanja toplog zraka već ima samo statički spiralni grijač.



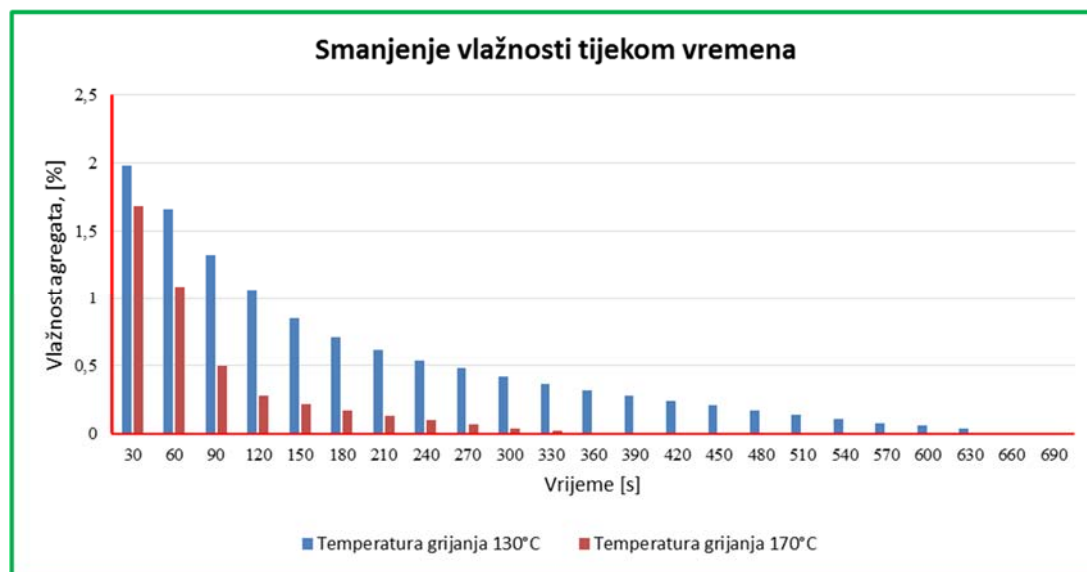
*Slika 6-25: Uređaj za ispitivanje vlažnosti*

Uzorak, frakcije 8/11 iz kamenoloma Hruškovec, prirodne vlažnosti pripremljen je i smješten u uređaj. Prvo ispitivanje provedeno je kod maksimalne temperature od 130°C, dok drugo ispitivanje je provedeno do maksimalne temperature od 170°C. Mjerenje je provedeno od prirodne vlažnosti pripremljenog uzorka do vremena kada je ta vlažnost bila jedna nuli.

Tablica 6-9: Rezultati ispitivanja frakcije 8/11 iz kamenoloma Hruškovec

<b>Frakcija 8/11 Hruškovec, prirodna vlaga</b>					
Vrijeme	Temperatura	Vlažnost uzorka	Vrijeme	Temperatura	Vlažnost uzorka
s	°C	%	s	°C	%
30	104	1,98	30	48	1,68
60	118	1,66	60	79	1,09
90	123	1,32	90	112	0,5
120	127	1,06	120	140	0,28
150	129	0,85	150	163	0,22
180	130	0,71	180	171	0,17
210	130	0,62	210	174	0,13
240	130	0,54	240	176	0,1
270	130	0,48	270	177	0,07
300	130	0,42	300	176	0,04
330	130	0,37	330	176	0,02
360	130	0,32	360	175	0
390	130	0,28			
420	130	0,24			
450	130	0,21			
480	130	0,17			
510	130	0,14			
540	130	0,11			
570	130	0,08			
600	130	0,06			
630	130	0,04			
660	130	0,01			
690	130	0			

Grafički prikaz smanjenja vlažnosti u vremenu dan je na *slici 6-26*.



Slika 6-26: Dijagram smanjenja vlažnosti frakcije 8/11

Sa slike 6-26. vidljivo je da pri temperaturi od 130°C potrebno je 690 s da vlažnost bude jednaka nuli. Početna vrijednost temperature u prvom slučaju iznosi 104°C (početna vlažnost 1,98%) dok je u drugom 48°C (početna vlažnost 1,68%). Najveći pad vlažnosti bez obzira na početnu temperaturu je između 60 s i 90 s. Iz dijagrama se može još primijetiti koliko je potrebno dugo vremena da voda iz pora kamena ishlapi. Najveći padovi vlažnosti su na samom početku sušenja do oko 150 s što iznosi oko 57% od ukupne vlažnosti dok nakon toga pad je vrlo usporen što se pripisuje slobodnoj vodi, odnosno vodi na površini zrna kamena.



## 7. OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

### 7.1. Uvodne napomene

U ovom poglavlju obrađeni su dobiveni rezultati ispitivanja i postupak izvođenja jednadžbi umanjene vlažnosti frakcija kamenih materijala te dobivanje konačne funkcije  $w_{d/D} = f(t, T, v)$ .

Osnovna jednadžba za izračun umanjene vlažnosti glasi:

$$w_{d/D} = \frac{m - m_{SM}}{m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.1.)$$

gdje je:

$w_{d/D}$  – umanjena vlažnost materijala ispitivane frakcije, [%]

$m$  – masa vlažnog materijala, [kg]

$m_{SM}$  – masa suhog materijala, [kg].

Tako, na primjeru frakcije 0/11 RA, s parametrima

- masa vlažnog uzorka iznosi  $m=400,0$  g,
- brzina 3,86 m/s,
- temperatura 33,1°C,
- vrijeme 60 s,
- masa uzorka nakon sušenja iznosi  $m_{SM}= 398,7$  g

Upisom podataka u 7.1. dobiva se postotak umanjene vlažnosti:

$$w_{0/11RA} = \frac{m - m_{SM}}{m} \cdot 100 = \frac{400,0 - 398,7}{400,0} \cdot 100 = 0,33 \%$$

Svi rezultati zaokruženi su na dva decimalna mjesta.

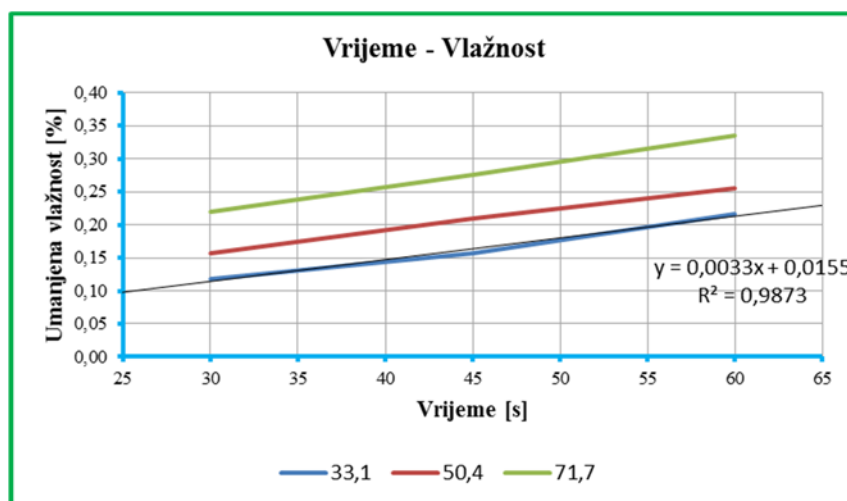
## 7.2. Izvođenje jednadžbi

### 7.2.1. Jednadžba za frakciju 0/2

Izrađen je tablični prikaz rezultata u odnosu vrijeme-vlažnost za frakciju kamenog materijala 0/2 (ulazna vlažnost 3,07%) pri brzini od 3,86 m/s te pripadnih temperatura. Iz dijagrama se uočava da je veza između vremena i vlažnosti linearna te je analiziran model veze  $w=a \cdot t+b$ . Navedeni koeficijenti temperature  $\alpha$  u *tablici 7.1.* odabrani su temeljem najbolje korelacije između rezultata. Linearna veza između vlažnosti i vremena je vrlo čvrsta s koeficijentom determinacije  $R^2=0,9873$

Tablica 7-1: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 0/2

Koeficijent za temperaturu, $\alpha$		1	1,27	1,7
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7
Vrijeme	30 s	0,12	0,16	0,22
Vrijeme	45 s	0,16	0,21	0,28
Vrijeme	60 s	0,22	0,26	0,33



Slika 7-1: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/2 s prikazanom regresijom

Prikazana jednadžba se tada dalje koristi za pronalaženje koeficijenta temperature.

$$w_{0/2} = \alpha \cdot (0,0033t + 0,015) [\%] \quad (7.2)$$

gdje su:

$w_{0/2}$  – umanjena vlažnost frakcije 0/2 [%]

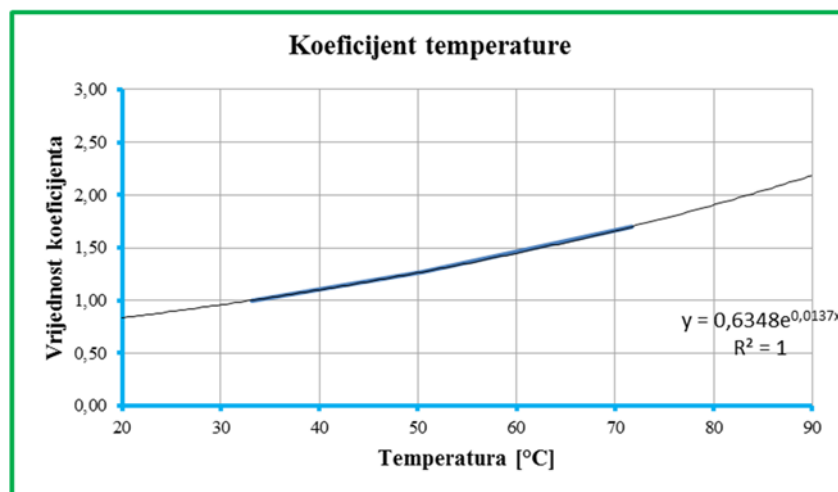
$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$t$  – vrijeme, s

Tablica 7-2: Temperaturni koeficijenti frakcije 0/2

Koeficijent za temperaturu, $\alpha$		1	1,27	1,7
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7

Za definiranje ovisnosti temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  i temperature promatran je model  $\alpha = a \cdot e^{bT}$ , pri kojem je koeficijent determinacije  $R^2 = 1$  što znači da se svi podaci mogu matematički opisati ovim modelom.



Slika 7-2: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 0/2 s prikazanom regresijom

Temperaturni koeficijent  $\alpha$  izrazimo kao:

$$\alpha = 0,6348e^{0,0137T} \quad (7.3)$$

gdje su:

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

e – prirodni logaritam (Eulerov broj ili Napierova konstanta) iznosi  $\approx 2,71828$

T – temperatura, °C

Jednadžba za umanjenje vlažnosti se proširi za koeficijent  $\beta$ , te se tada dobiva:

$$w_{0/2} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0033t + 0,0155) [\%] \quad (7.4)$$

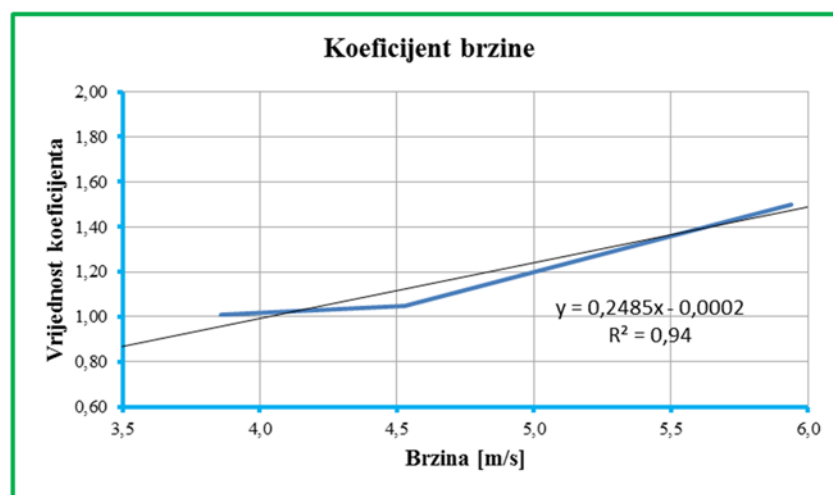
gdje je:

$\beta$  – koeficijent brzine

Iz jednadžbe 7.4 traži se koeficijenti brzine  $\beta$  koji se najbolje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima postignutih umanjenih vlažnosti. Koeficijenti brzine odabrani su proizvoljno na način što manje pogreške prilikom definiranja jednadžbe ponašanja.

Tablica 7-3: Koeficijenti brzine frakcije 0/2

Koeficijent za brzinu, $\beta$		1,01	1,05	1,5
Brzina	m/s	3,86	4,53	5,94



Slika 7-3: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 0/2 s prikazanom regresijom

$$\beta = 0,2485 \cdot v - 0,0002 \quad (7.5)$$

Sada jednadžba za frakciju 0/2 mm glasi:

$$w_{0/2} = (0,6348 e^{0,0137T}) \cdot (0,2485 v - 0,0002) \cdot (0,0033 t + 0,0155) [\%] \quad (7.6)$$

gdje je:

v – brzina strujanja zraka, m/s

Nakon formiranih i prikazanih jednadžbi izračunata su odstupanja matematičkog i eksperimentalnog modela (*tablica 7-4*).

*Tablica 7-4: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 0/2 Špica*

<b>Frakcija 0/2 Špica, prirodna vlaga 3,07%</b>					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Eksperimentalni rezultat umanjene vlažnosti	Matematički model predložene jednadžbe	Relativna razlika dobivenih rezultata
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,12	<b>0,11</b>	-9,09
3,86	33,1	45	0,16	<b>0,16</b>	0,00
3,86	33,1	60	0,22	<b>0,20</b>	-10,00
3,86	50,4	30	0,16	<b>0,14</b>	-14,29
3,86	50,4	45	0,21	<b>0,20</b>	-5,00
3,86	50,4	60	0,26	<b>0,26</b>	0,00
3,86	71,7	30	0,22	<b>0,19</b>	-15,79
3,86	71,7	45	0,28	<b>0,27</b>	-3,70
3,86	71,7	60	0,33	<b>0,35</b>	5,71
4,53	39,2	30	0,14	<b>0,14</b>	0,00
4,53	39,2	45	0,18	<b>0,20</b>	10,00
4,53	39,2	60	0,24	<b>0,26</b>	7,69
4,53	60,9	30	0,16	<b>0,19</b>	15,79
4,53	60,9	45	0,24	<b>0,27</b>	11,11
4,53	60,9	60	0,35	<b>0,35</b>	0,00
4,53	85,3	30	0,22	<b>0,26</b>	15,38
4,53	85,3	45	0,29	<b>0,38</b>	23,68
4,53	85,3	60	0,39	<b>0,49</b>	20,41
5,94	37,8	30	0,22	<b>0,18</b>	-22,22
5,94	37,8	45	0,29	<b>0,26</b>	-11,54
5,94	37,8	60	0,35	<b>0,34</b>	-2,94
5,94	64,3	30	0,28	<b>0,26</b>	-7,69
5,94	64,3	45	0,37	<b>0,37</b>	0,00
5,94	64,3	60	0,49	<b>0,48</b>	-2,08
5,94	94,0	30	0,37	<b>0,39</b>	5,13
5,94	94,0	45	0,47	<b>0,56</b>	16,07
5,94	94,0	60	0,61	<b>0,72</b>	15,28

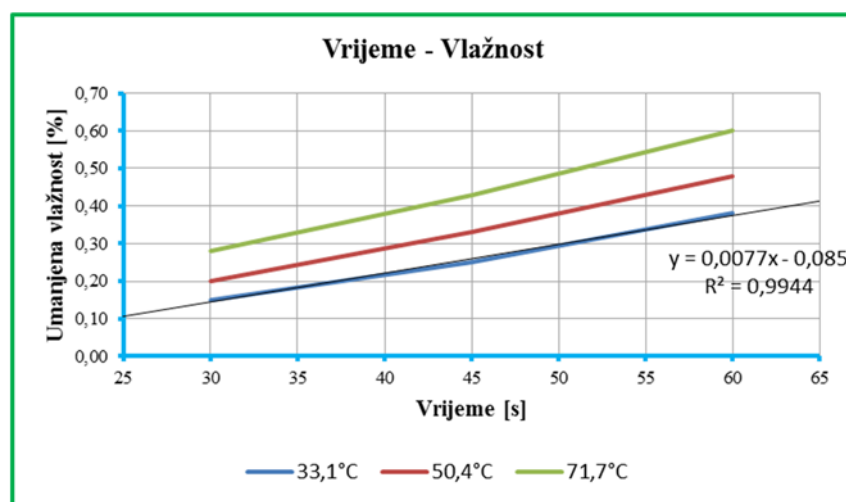
## 7.2.2. Jednadžba za frakciju 2/4

Izrađen je prikaz rezultata u odnosu vrijeme-vlažnost za frakciju kamenog materijala 2/4 pri brzini od 3,86 m/s sa pripadajućim temperaturama. Iz dijagrama se uočava da je veza između vremena i vlažnosti linearna te je analiziran model veze  $w = a \cdot t + b$ .

Navedeni koeficijenti temperature u tablici 7.5. odabrani su temeljem najbolje korelacije između rezultata. Linearna veza između vlažnosti i vremena je vrlo čvrsta s koeficijentom determinacije  $R^2 = 0,9944$ .

Tablica 7-5: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 2/4

Koeficijent za temperaturu, $\alpha$		1	1,26	1,63
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7
Vrijeme	30 s	0,15	0,20	0,28
Vrijeme	45 s	0,25	0,33	0,43
Vrijeme	60 s	0,38	0,48	0,60



Slika 7-4: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 2/4 s prikazanom regresijom

Prikazana jednadžba se tada dalje koristi za pronalaženje koeficijenta temperature.

$$w_{2/4} = \alpha \cdot (0,0077t - 0,085) [\%] \quad (7.7)$$

gdje su:

$w_{2/4}$  – umanjena vlažnost frakcije 2/4 [%]

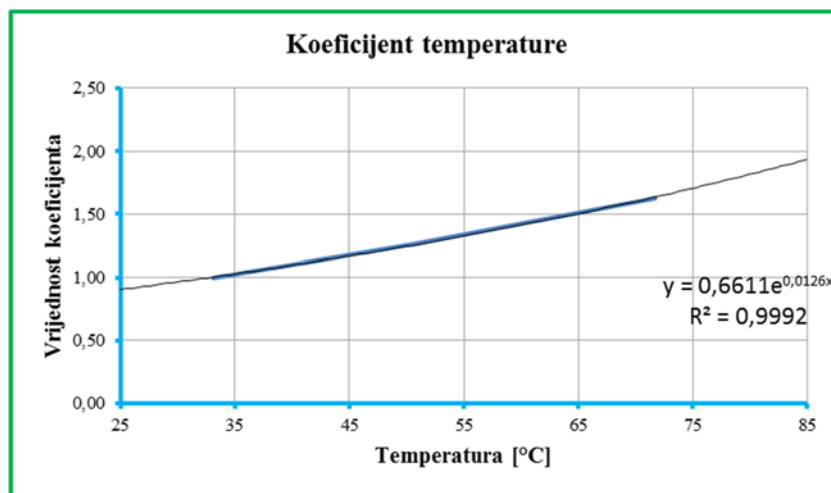
$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$t$  – vrijeme, s

Tablica 7-6: Temperaturni koeficijenti frakcije 2/4

Koeficijent za temperaturu		1	1,26	1,63
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7

Za definiranje ovisnosti temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  i temperature promatran je model  $\alpha = a \cdot e^{bT}$ , pri kojem je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9992$  što znači da se svi podaci mogu matematički opisati ovim modelom.



Slika 7-5: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 2/4 s prikazanom regresijom

Temperaturni koeficijent  $\alpha$  izrazimo kao:

$$\alpha = 0,6611 e^{0,0126T} \quad (7.8)$$

gdje su:

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$e$  – prirodni logaritam iznosi  $\approx 2,71828$

$T$  – temperatura, °C

Jednadžba za umanjenje vlažnosti se proširi za koeficijent  $\beta$ , te se tada dobiva:

$$w_{0/2} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0077t - 0,085) [\%] \quad (7.9)$$

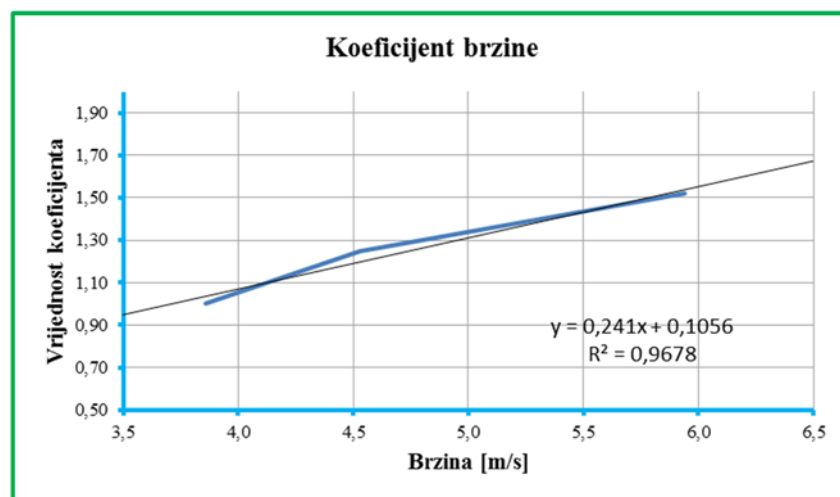
gdje je:

$\beta$  – koeficijent brzine

Iz jednadžbe 7.10 tražimo koeficijente brzine koji se najbolje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima postignutih umanjenih vlažnosti.

Tablica 7-7: Koeficijenti brzine frakcije 2/4

Koeficijent za brzinu, $\beta$		1,0	1,25	1,52
Brzina	m/s	3,86	4,53	5,94



Slika 7-6: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 2/4 s prikazanom regresijom

$$\beta = 0,241 \cdot v + 0,1056 \quad (7.10)$$

Sada jednadžba za frakciju 2/4 mm glasi:

$$w_{2/4} = (0,6611 \cdot e^{0,0126T}) \cdot (0,241 \cdot v + 0,1056) \cdot (0,0077 \cdot t - 0,085) [\%] \quad (7.11)$$

gdje je:

$v$  – brzina strujanja zraka, m/s.

Nakon formiranih i prikazanih jednadžbi izračunata su odstupanja matematičkog i eksperimentalnog modela.



Tablica 7-8: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 2/4 Hruškovec

<b>Frakcija 2/4 Hruškovec, prirodna vlaga 3,31%</b>					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Eksperimentalni rezultat umanjene vlažnosti	Matematički model predložene jednadžbe	Relativna razlika dobivenih rezultata
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,15	<b>0,15</b>	0,00
3,86	33,1	45	0,25	<b>0,27</b>	7,41
3,86	33,1	60	0,38	<b>0,39</b>	2,56
3,86	50,4	30	0,20	<b>0,19</b>	-5,26
3,86	50,4	45	0,33	<b>0,34</b>	2,94
3,86	50,4	60	0,48	<b>0,49</b>	2,04
3,86	71,7	30	0,28	<b>0,25</b>	-12,00
3,86	71,7	45	0,43	<b>0,44</b>	2,27
3,86	71,7	60	0,60	<b>0,64</b>	6,25
4,53	39,2	30	0,23	<b>0,19</b>	-21,05
4,53	39,2	45	0,33	<b>0,34</b>	2,94
4,53	39,2	60	0,43	<b>0,49</b>	12,24
4,53	60,9	30	0,30	<b>0,25</b>	-20,00
4,53	60,9	45	0,48	<b>0,45</b>	-6,67
4,53	60,9	60	0,60	<b>0,64</b>	6,25
4,53	85,3	30	0,40	<b>0,34</b>	-17,65
4,53	85,3	45	0,60	<b>0,61</b>	1,64
4,53	85,3	60	0,78	<b>0,87</b>	10,34
5,94	37,8	30	0,28	<b>0,24</b>	-16,67
5,94	37,8	45	0,40	<b>0,43</b>	6,98
5,94	37,8	60	0,53	<b>0,62</b>	14,52
5,94	64,3	30	0,40	<b>0,33</b>	-21,21
5,94	64,3	45	0,65	<b>0,60</b>	-8,33
5,94	64,3	60	0,81	<b>0,86</b>	5,81
5,94	94,0	30	0,50	<b>0,48</b>	-4,17
5,94	94,0	45	0,73	<b>0,87</b>	16,09
5,94	94,0	60	1,01	<b>1,25</b>	19,20

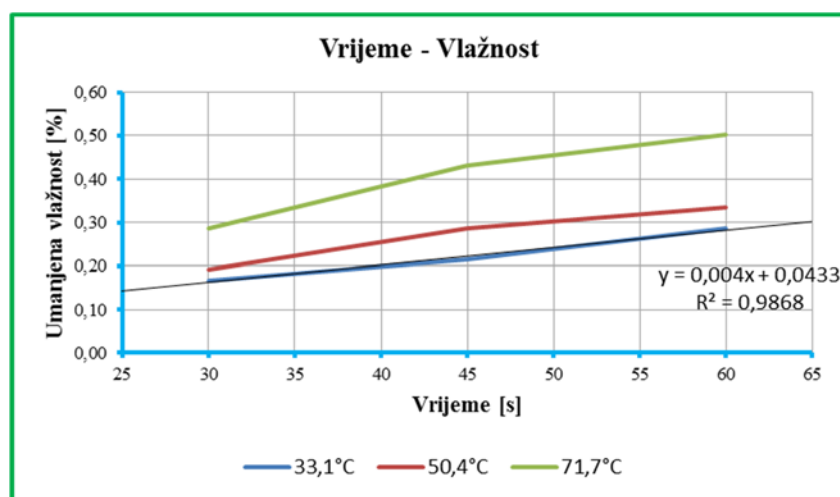
### 7.2.3. Jednadžba za frakciju 4/8

Izrađen je prikaz rezultata u odnosu vrijeme-vlažnost za frakciju kamenog materijala 4/8 pri brzini od 3,86 m/s. Iz dijagrama se uočava da je veza između vremena i vlažnosti linearna te je analiziran model veze  $w = a \cdot t + b$ .

Navedeni koeficijenti temperature u tablici 7-9 odabrani su temeljem najbolje korelacije između rezultata. Linearna veza između vlažnosti i vremena je vrlo čvrsta s koeficijentom determinacije  $R^2 = 0,9868$ .

Tablica 7-9: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 4/8

Koeficijent za temperaturu, $\alpha$		1,0	1,21	1,77
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7
Vrijeme	30 s	0,17	0,19	0,29
Vrijeme	45 s	0,21	0,29	0,43
Vrijeme	60 s	0,29	0,33	0,50



Slika 7-7: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 4/8 s prikazanom regresijom

Prikazana jednadžba se tada dalje koristi za pronalaženje koeficijenta temperature.

$$w_{4/8} = \alpha \cdot (0,004t + 0,0433) [\%] \quad (7.12)$$

gdje su:

$w_{4/8}$  – umanjena vlažnost frakcije 4/8 [%]

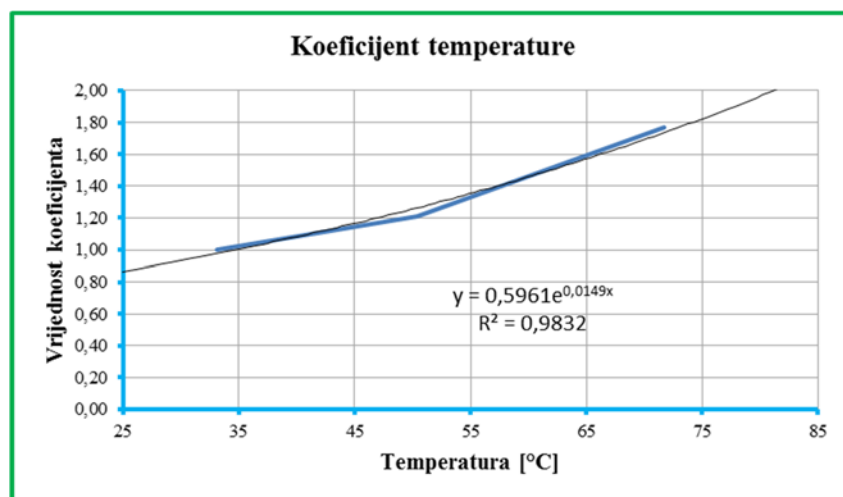
$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$t$  – vrijeme, s

Tablica 7-10: Temperaturni koeficijenti frakcije 4/8

Koeficijent za temperaturu		1,0	1,21	1,77
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7

Za definiranje ovisnosti temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  i temperature promatran je model  $\alpha = a \cdot e^{bT}$ , pri kojem je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9832$  što znači da se svi podaci mogu matematički opisati ovim modelom.



Slika 7-8: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 4/8 s prikazanom regresijom

Temperaturni koeficijent  $\alpha$  izrazimo kao:

$$\alpha = 0,5961e^{0,0149T} \quad (7.13)$$

gdje su:

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$e$  – prirodni logaritam iznosi  $\approx 2,71828$

$T$  – temperatura, °C

Jednadžba za umanjene vlažnosti se proširi za koeficijent  $\beta$ , te se tada dobiva:

$$w_{4/8} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,004t + 0,043) \beta \quad (7.14)$$

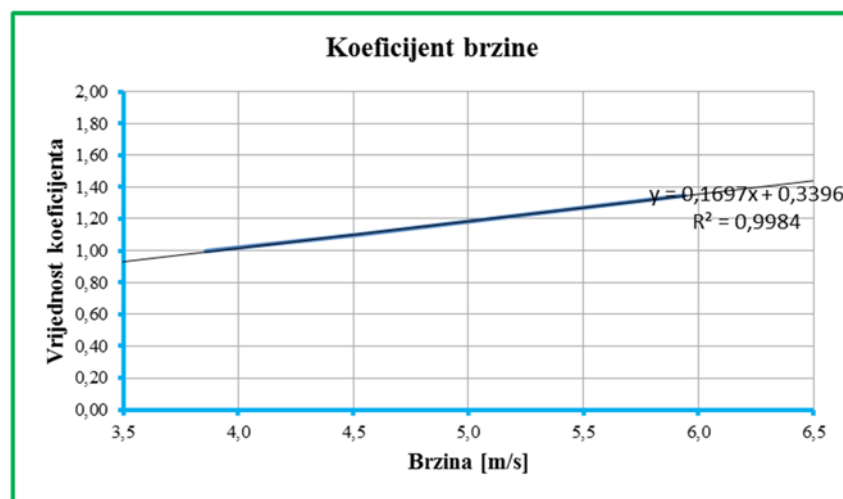
gdje je:

$\beta$  – koeficijent brzine

Iz jednadžbe 7-14 tražimo koeficijente brzine koji se najbolje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima postignutih umanjjenih vlažnosti.

Tablica 7-11: Koeficijenti brzine frakcije 4/8

Koeficijent za brzinu, $\beta$		1,0	1,1	1,35
Brzina	m/s	3,86	4,53	5,94



Slika 7-9: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 4/8 s prikazanom regresijom

$$\beta = 0,1697 \cdot v + 0,3396 \quad (7.15)$$

Sada jednadžba za frakciju 4/8 mm glasi:

$$w_{4/8} = (0,5961 \cdot e^{0,0149T}) \cdot (0,1697 \cdot v + 0,3396) \cdot (0,004 t + 0,043) \beta \quad (7.16)$$

gdje je:

$v$  – brzina strujanja zraka, m/s

Tablica 7-12: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 4/8 Špica

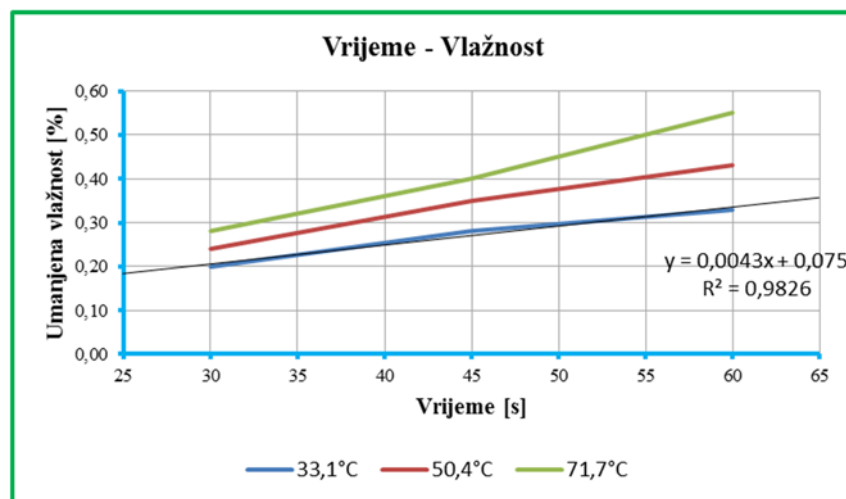
Frakcija 4/8 Špica, prirodna vlaga 2,1%					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Eksperimentalni rezultat umanjene vlažnosti	Matematički model predložene jednadžbe	Relativna razlika dobivenih rezultata
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,17	<b>0,16</b>	-6,25
3,86	33,1	45	0,21	<b>0,22</b>	4,55
3,86	33,1	60	0,29	<b>0,28</b>	-3,57
3,86	50,4	30	0,19	<b>0,21</b>	9,52
3,86	50,4	45	0,29	<b>0,28</b>	-3,57
3,86	50,4	60	0,33	<b>0,36</b>	8,33
3,86	71,7	30	0,29	<b>0,28</b>	-3,57
3,86	71,7	45	0,43	<b>0,39</b>	-10,26
3,86	71,7	60	0,50	<b>0,49</b>	-2,04
4,53	39,2	30	0,26	<b>0,19</b>	-36,84
4,53	39,2	45	0,33	<b>0,26</b>	-26,92
4,53	39,2	60	0,38	<b>0,34</b>	-11,76
4,53	60,9	30	0,29	<b>0,27</b>	-7,41
4,53	60,9	45	0,38	<b>0,37</b>	-2,70
4,53	60,9	60	0,50	<b>0,46</b>	-8,70
4,53	85,3	30	0,38	<b>0,38</b>	0,00
4,53	85,3	45	0,48	<b>0,53</b>	9,43
4,53	85,3	60	0,62	<b>0,67</b>	7,46
5,94	37,8	30	0,31	<b>0,23</b>	-34,78
5,94	37,8	45	0,36	<b>0,32</b>	-12,50
5,94	37,8	60	0,41	<b>0,40</b>	-2,50
5,94	64,3	30	0,33	<b>0,34</b>	2,94
5,94	64,3	45	0,48	<b>0,47</b>	-2,13
5,94	64,3	60	0,60	<b>0,59</b>	-1,69
5,94	94,0	30	0,38	<b>0,53</b>	28,30
5,94	94,0	45	0,57	<b>0,73</b>	21,92
5,94	94,0	60	0,60	<b>0,92</b>	34,78

## 7.2.4. Jednadžba za frakciju 8/11

Izrađen je prikaz rezultata u odnosu vrijeme-vlažnost za frakciju kamenog materijala 8/11 pri brzini od 3,86 m/s. Iz dijagrama se uočava da je veza između vremena i vlažnosti linearna te je analiziran model veze  $w=a \cdot t+b$ . Navedeni koeficijenti temperature u tablici 7.13. odabrani su temeljem najbolje korelacije između rezultata. Linearna veza između vlažnosti i vremena je vrlo čvrsta s koeficijentom determinacije  $R^2=0,9826$ .

Tablica 7-13: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 8/11

Koeficijent za temperaturu, □		1,0	1,28	1,6
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7
Vrijeme	30 s	0,20	0,24	0,28
Vrijeme	45 s	0,28	0,35	0,40
Vrijeme	60 s	0,33	0,43	0,55



Slika 7-10: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 8/11 s prikazanom regresijom

Prikazana jednadžba se tada dalje koristi za pronalaženje koeficijenata temperature.

$$w_{8/11} = \alpha \cdot (0,0043t + 0,075) [\%] \quad (7.17)$$

gdje su:

$w_{8/11}$  – umanjena vlažnost frakcije 8/11 [%]

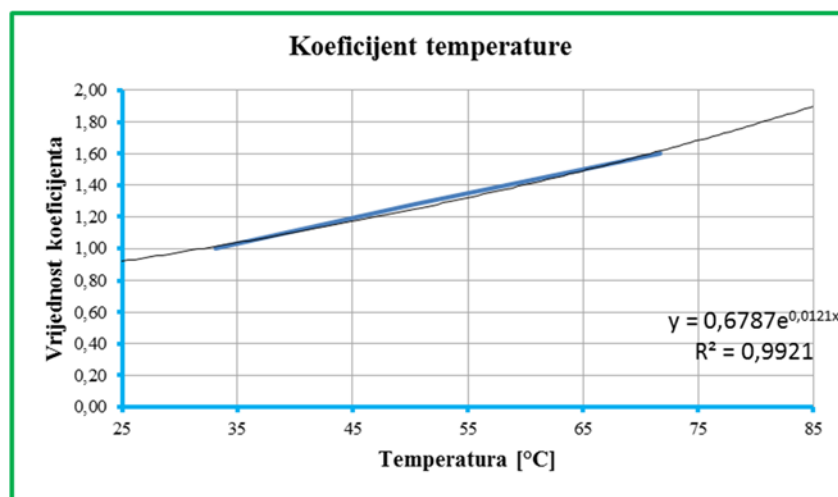
$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

t – vrijeme, s

Tablica 5-14: Temperaturni koeficijenti frakcije 8/11

Koeficijent za temperaturu		1,0	1,28	1,6
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7

Za definiranje ovisnosti temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  i temperature promatran je model  $\alpha = a \cdot e^{bT}$ , pri kojem je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9921$  što znači da se svi podaci mogu matematički opisati ovim modelom.



Slika 7-11: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 8/11 s prikazanom regresijom

Temperaturni koeficijent  $\alpha$  izrazimo kao:

$$\alpha = 0,6787e^{0,0121T} \quad (7.18)$$

gdje su:

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

e – prirodni logaritam iznosi  $\approx 2,71828$

T – temperatura, °C

Jednadžba za umanjenje vlažnosti se proširi za koeficijent  $\beta$ , te se tada dobiva:

$$w_{8/11} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0043t + 0,075) [\%] \quad (7.19)$$

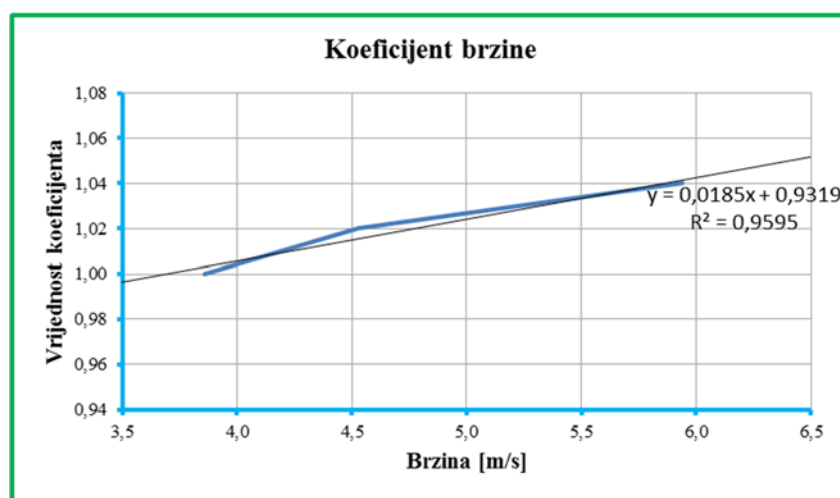
gdje je:

$\beta$  – koeficijent brzine

Iz jednadžbe 7.19 traže se koeficijenti brzine koji se najbolje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima postignutih umanjjenih vlažnosti.

Tablica 7-15: Koeficijenti brzine frakcije 8/11

Koeficijent za brzinu, $\beta$		1,0	1,02	1,04
Brzina	m/s	3,86	4,53	5,94



Slika 7-12: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 8/11 s prikazanom regresijom

$$\beta = 0,0185 \cdot v + 0,9319 \quad (7.20)$$

Sada jednadžba za frakciju 8/11 mm glasi:

$$w_{8/11} = (0,6787 \cdot e^{0,0121T}) \cdot (0,0185 v + 0,9319) \cdot (0,0043 t + 0,075) [\%] \quad (7.21)$$

gdje je:

$v$  – brzina strujanja zraka, m/s



Tablica 7-16: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 8/11 Špica

Frakcija 8/11 Špica, prirodna vlaga 1,03%					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Eksperimentalni rezultat umanjene vlažnosti	Matematički model predložene jednadžbe	Relativna razlika dobivenih rezultata
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,20	<b>0,21</b>	4,76
3,86	33,1	45	0,28	<b>0,27</b>	-3,70
3,86	33,1	60	0,33	<b>0,34</b>	2,94
3,86	50,4	30	0,24	<b>0,26</b>	7,69
3,86	50,4	45	0,35	<b>0,34</b>	-2,94
3,86	50,4	60	0,43	<b>0,42</b>	-2,38
3,86	71,7	30	0,28	<b>0,33</b>	15,15
3,86	71,7	45	0,40	<b>0,44</b>	9,09
3,86	71,7	60	0,55	<b>0,54</b>	-1,85
4,53	39,2	30	0,23	<b>0,23</b>	0,00
4,53	39,2	45	0,30	<b>0,30</b>	0,00
4,53	39,2	60	0,35	<b>0,37</b>	5,41
4,53	60,9	30	0,30	<b>0,29</b>	-3,45
4,53	60,9	45	0,38	<b>0,39</b>	2,56
4,53	60,9	60	0,45	<b>0,48</b>	6,25
4,53	85,3	30	0,35	<b>0,39</b>	10,26
4,53	85,3	45	0,43	<b>0,52</b>	17,31
4,53	85,3	60	0,53	<b>0,64</b>	17,19
5,94	37,8	30	0,23	<b>0,23</b>	0,00
5,94	37,8	45	0,33	<b>0,30</b>	-10,00
5,94	37,8	60	0,45	<b>0,37</b>	-21,62
5,94	64,3	30	0,28	<b>0,31</b>	9,68
5,94	64,3	45	0,39	<b>0,41</b>	4,88
5,94	64,3	60	0,48	<b>0,51</b>	5,88
5,94	94,0	30	0,40	<b>0,45</b>	11,11
5,94	94,0	45	0,48	<b>0,59</b>	18,64
5,94	94,0	60	0,60	<b>0,73</b>	17,81

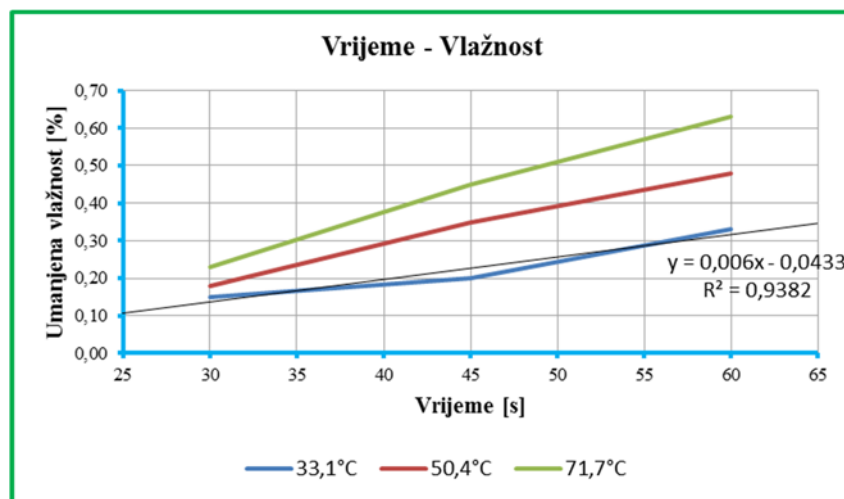
## 7.2.5. Jednadžba za frakciju 0/11 RA

Prikazani su rezultati ispitivanja reciklažnog asfaltnog agregata (RA). Naime, ovdje je bitno znati da kada vlažnost RA prijeđe granicu od 3% tada je izrazito teško gotovo nemoguće raditi s tim materijalom kod cikličkih asfaltnih baza dodavanjem RA u bubanj. Sa vlažnosti većoj od 3 % događa se efekt izrazito velike količine vodene pare koja se događa kada se materijal vanjske temperature dodaje u kameni materijal temperature veće od 170°C. Projektirani i postavljeni sustavi cijevi za odvodnju pare kod doziranja u miješalicu nisu preporučljivi za vlažnosti veće od 3%. S druge strane kada je doziranje direktno u miješalicu asfaltne baze s tako visokom vlagom događa se efekt nestabilnosti vaga na asfaltnoj bazi, te tada doziranja komponenti po šarži nisu u okvirima točnosti što dovodi do efekta nesukladnog proizvoda. Stoga je poželjno koristiti RA sa vlažnošću do maksimalnih 3%.

Izrađen je prikaz rezultata u odnosu vrijeme-vlažnost za frakciju kamenog materijala 0/11 RA pri brzini od 3,86 m/s s pripadajućim temperaturama. Iz dijagrama se uočava da je veza između vremena i vlažnosti linearna te je analiziran model veze  $w=a \cdot t+b$ . Navedeni koeficijenti temperature u tablici 7.17. odabrani su temeljem najbolje korelacije između rezultata. Linearna veza između vlažnosti i vremena je vrlo čvrsta s koeficijentom determinacije  $R^2=0,9382$

Tablica 7-17: Odnos prikazanih rezultata vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 RA

Koeficijent za temperaturu, $\alpha$		1,0	1,5	1,86
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7
Vrijeme	30 s	0,15	0,18	0,23
Vrijeme	45 s	0,20	0,35	0,45
Vrijeme	60 s	0,33	0,48	0,63



Slika 7-13: Dijagram vrijeme-vlažnost frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom

Prikazana jednadžba se tada dalje koristi za pronalaženje koeficijenata temperature.

$$w_{0/11RA} = \alpha \cdot (0,006 \cdot t - 0,0433) [\%] \quad (7.22)$$

gdje su:

$w_{0/11RA}$  – umanjena vlažnost frakcije 0/11 RA [%]

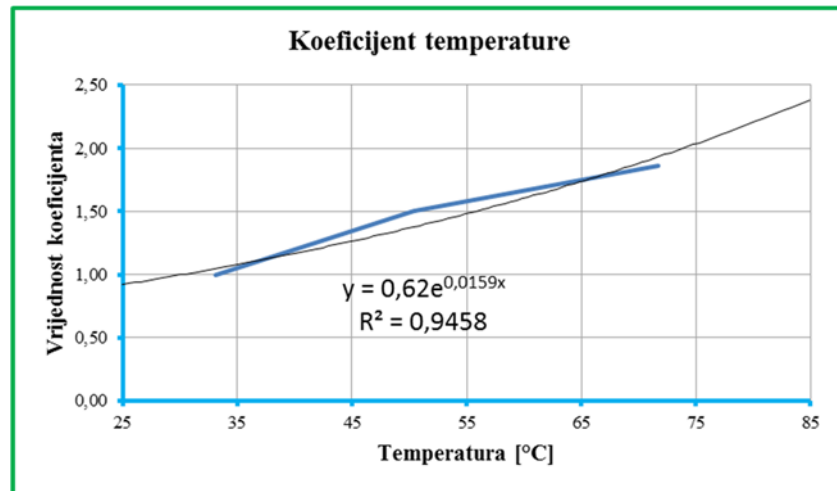
$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$t$  – vrijeme, s

Tablica 7-18: Temperaturni koeficijenti frakcije 0/11 RA

Koeficijent za temperaturu		1,0	1,5	1,86
Temperatura	°C	33,1	50,4	71,7

Za definiranje ovisnosti temperaturnog koeficijenta  $\alpha$  i temperature promatran je model  $\alpha = a \cdot e^{bT}$ , pri kojem je koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9458$  što znači da se svi podaci mogu matematički opisati ovim modelom.



Slika 7-14: Dijagram koeficijenta temperature frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom

Temperaturni koeficijent  $\alpha$  izrazi se kao:

$$\alpha = 0,62e^{0,0159T} \quad (7.23)$$

gdje su:

$\alpha$  – traženi temperaturni koeficijent

$e$  – prirodni logaritam iznosi  $\approx 2,71828$

$T$  – temperatura, °C

Jednadžba za umanjenje vlažnosti se proširi za koeficijent  $\beta$ , te se tada dobiva:

$$w_{0/11RA} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,006t - 0,0433) [\%] \quad (7.24)$$

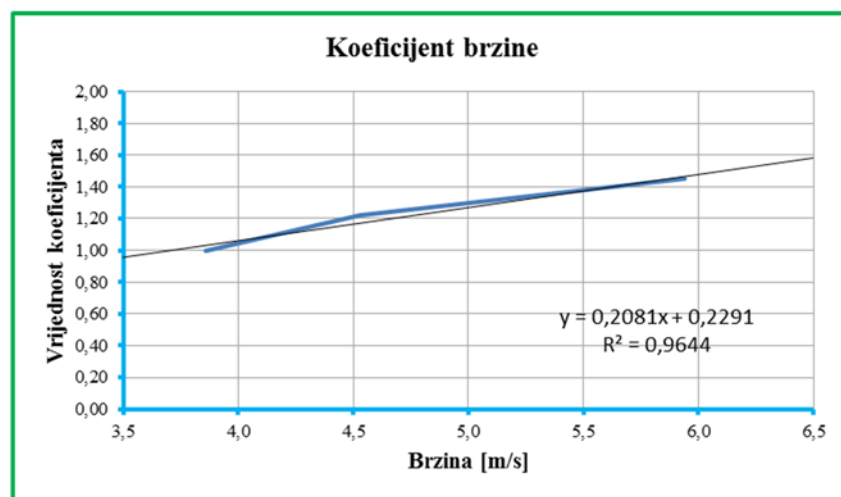
gdje je:

$\beta$  – koeficijent brzine

Iz jednadžbe 7.24 traže se koeficijenti brzine koji se najbolje poklapaju sa izmjerenim vrijednostima postignutih umanjenih vlažnosti.

Tablica 7-19: Koeficijenti brzine frakcije 0/11 RA

Koeficijent za brzinu, $\beta$		1,0	1,22	1,45
Brzina	m/s	3,86	4,53	5,94



Slika 7-15: Dijagram koeficijenta brzine frakcije 0/11 RA s prikazanom regresijom

$$\beta = 0,2081 \cdot v + 0,2291 \quad (7.25)$$

Sada jednadžba za frakciju 0/11 RA mm glasi:

$$w_{0/11RA} = (0,62 \cdot e^{0,0159T}) \cdot (0,2081 \cdot v + 0,2291) \cdot (0,006 \cdot t - 0,0433) [\%] \quad (7.26)$$

gdje je:

$v$  – brzina strujanja zraka, m/s

Tablica 7-20: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i matematičkog modela frakcije 0/11 RA

<b>Frakcija 0/11 reciklažni asfaltni agregat, prirodna vlaga 1,03%</b>					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Eksperimentalni rezultat umanjene vlažnosti	Matematički model predložene jednadžbe	Relativna razlika dobivenih rezultata
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,15	<b>0,15</b>	0,00
3,86	33,1	45	0,20	<b>0,25</b>	20,00
3,86	33,1	60	0,33	<b>0,34</b>	2,94
3,86	50,4	30	0,18	<b>0,19</b>	5,26
3,86	50,4	45	0,35	<b>0,32</b>	-9,37
3,86	50,4	60	0,48	<b>0,45</b>	-6,67
3,86	71,7	30	0,23	<b>0,27</b>	14,81
3,86	71,7	45	0,45	<b>0,45</b>	0,00
3,86	71,7	60	0,63	<b>0,63</b>	0,00
4,53	39,2	30	0,20	<b>0,19</b>	-5,26
4,53	39,2	45	0,30	<b>0,31</b>	3,23
4,53	39,2	60	0,45	<b>0,43</b>	-4,65
4,53	60,9	30	0,30	<b>0,26</b>	-15,38
4,53	60,9	45	0,45	<b>0,43</b>	-4,65
4,53	60,9	60	0,58	<b>0,61</b>	4,92
4,53	85,3	30	0,43	<b>0,39</b>	-10,26
4,53	85,3	45	0,60	<b>0,64</b>	6,25
4,53	85,3	60	0,86	<b>0,89</b>	3,37
5,94	37,8	30	0,28	<b>0,23</b>	-21,74
5,94	37,8	45	0,40	<b>0,38</b>	-5,26
5,94	37,8	60	0,48	<b>0,52</b>	7,69
5,94	64,3	30	0,35	<b>0,35</b>	0,00
5,94	64,3	45	0,63	<b>0,57</b>	-10,53
5,94	64,3	60	0,81	<b>0,80</b>	-1,25
5,94	94,0	30	0,53	<b>0,55</b>	3,64
5,94	94,0	45	0,81	<b>0,92</b>	11,96
5,94	94,0	60	1,01	<b>1,28</b>	21,09

## 7.2.6. Jednadžba za različite debljine slojeva

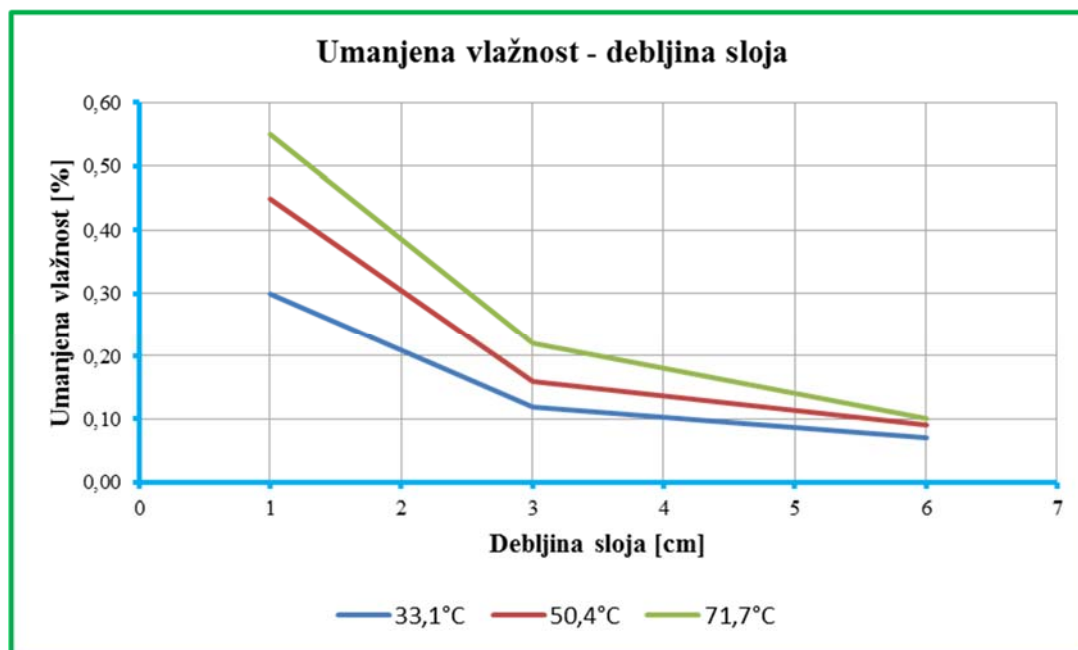
Specifičnost frakcija kamenih materijala je u tome što su graduirane prema veličini zrna, pa shodno tome imamo frakciju veličine od 0 do 2 mm, od 2 do 4 mm, i tako redom. Kada se frakcije agregata kamenih materijala gledaju zasebno tako frakcija 0/4 ima nasipnu gustoću određenu prema HRN EN 1097-3:2004 [81] oko  $1,7 \text{ Mg/m}^3$ , dok krupne frakcije 4/8, 8/16 i 16/32 imaju nasipnu gustoću oko  $1,4 \text{ Mg/m}^3$ . Prema navedenim podacima i određenoj gustoći frakcija određeno prema HRN EN 1097-6:2013 [80] može se izračunati sadržaj šupljina između čestica frakcija kamenih agregata. Ako je gustoća zasićenih, a površinski suhих zrna oko  $2,69 \text{ Mg/m}^3$  to znači da za frakciju 0/4 mm imamo šupljine oko 36%, dok za krupne frakcije je to oko 47%.

Kada frakcije kamenih materijala padaju na kosu traku koja ih vodi do bubnja za sušenje možemo reći da u bilo kojoj debljini sloja imamo šupljine između čestica frakcija oko 42%. Upravo zahvaljujući tim šupljinama kod strujanja zraka dolazi do efekta da topli zrak obuhvaća pojedinačnu česticu oko nje. Time je olakšani postupak sušenja i kod tanjih slojeva sušenje je izraženije.

Tablica 7-21: Rezultati eksperimentalnog ispitivanja različitih debljina slojeva frakcije 0/2

Frakcija 0/2 Špica					
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Debljina sloja 6 cm (3,07% vlažnosti)	Debljina sloja 3 cm (3,07% vlažnosti)	Debljina sloja 1 cm (5,42% vlažnosti)
m/s	°C	s	%	%	%
3,86	33,1	30	0,07	0,12	0,30
3,86	33,1	45	0,09	0,16	0,40
3,86	33,1	60	0,13	0,22	0,60
3,86	50,4	30	0,09	0,16	0,45
3,86	50,4	45	0,13	0,21	0,60
3,86	50,4	60	0,17	0,26	0,86
3,86	71,7	30	0,10	0,22	0,55
3,86	71,7	45	0,15	0,28	0,86
3,86	71,7	60	0,20	0,33	1,06

Tablica 7-21 sadrži rezultate ispitivanja različitih debljina slojeva frakcije agregata 0/2. Grafički prikaz rezultata dan je na slici 7-16.



Slika 7-16: Dijagram umanjene vlažnosti i debljine promatranog sloja

Iz prikazanog dijagrama uočava se sličnost u ponašanju različitih debljina slojeva frakcije 0/2 u istim uvjetima.

Sva ispitivanja prikazana u ovom radu provedena su na debljinama uzoraka od 3 cm. Pri pronalaženju ove funkcije matematičkog opisivanja ponašanja umanjenja vlažnosti određena je referentna vrijednost debljine sloja od 3 cm.

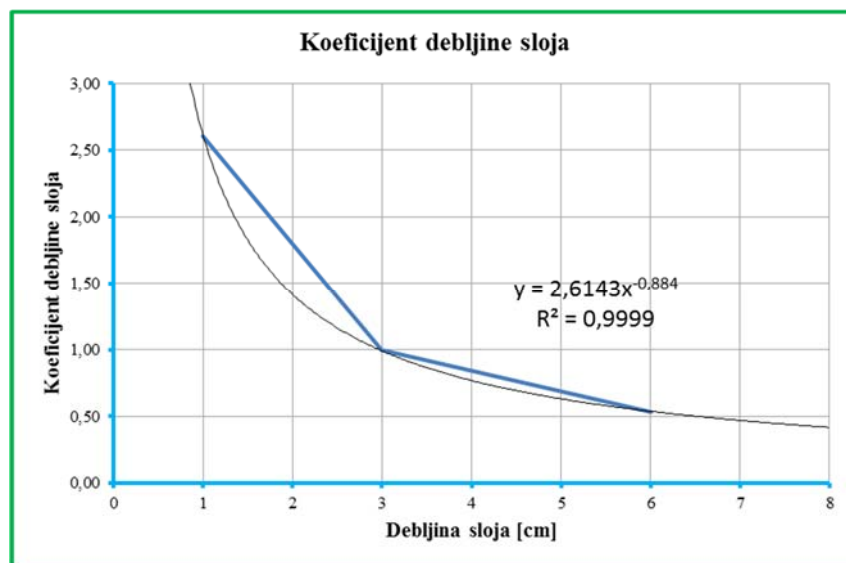
Pri brzini strujanja zraka od 3,86 m/s, temperature 33,1°C i vremenu od 30 s, prvo je izrađeni kvocijent između rezultata umanjene vlažnosti debljine sloja od 1 i 3 cm, te u drugom slučaju kvocijent od 6 i 3 cm. Tako redom je izrađen istim postupkom kvocijent za temperaturu od 50,4°C i za 71,7°C. Kao konačna vrijednost uzeta je aritmetička sredina koja je prikazana u tablici 7-22.

Tablica 7-22: Koeficijenti kvocijenata za različite debljine

Koeficijent za temperaturu		2,604	1,000	0,533
Debljina sloja	cm	1	3	6

Prema tablici iznad izrađen je dijagram prikazan na slici 7-17.





Slika 7-17: Dijagram koeficijenata i debljine slojeva

Na dijagramu je prikazana regresijska krivulja s pripadajućom jednačinom koja glasi:

$$\gamma = 2,6143h^{-0,884} \quad (7.27)$$

gdje su:

$\gamma$  – koeficijent promatrane debljine sloja

$h$  – debljina promatranog sloja

Matematičkim modelom definirana je umanjena vlažnost frakcije koja se množi s koeficijentom promatrane debljine sloja, te tada jednačina glasi:

$$w_u = w_{d/D} \cdot \gamma \quad (7.28)$$

gdje su:

$w_u$  – rezultat umanjene vlažnosti, [%],

$w_{d/D}$  – vlažnost frakcije (npr. 0/2, 4/8), [%],

$\gamma$  – koeficijent promatrane debljine sloja.

Tablica 7-23: Usporedba rezultata eksperimentalnog i matematičkog modela različitih debljina slojeva frakcije 0/2

Frakcija 0/2 Špica								
Brzina strujanja zraka	Temperatura	Vrijeme	Debljina sloja 6 cm (eksp.)	Debljina sloja 6 cm (mat.)	Debljina sloja 3 cm (eksp.)	Debljina sloja 3 cm (mat.)	Debljina sloja 1 cm (eksp.)	Debljina sloja 1 cm (mat.)
m/s	°C	s	%	%	%	%	%	%
3,86	33,1	30	0,07	<b>0,06</b>	0,12	<b>0,12</b>	0,30	<b>0,31</b>
3,86	33,1	45	0,09	<b>0,09</b>	0,16	<b>0,16</b>	0,40	<b>0,42</b>
3,86	33,1	60	0,13	<b>0,12</b>	0,22	<b>0,22</b>	0,60	<b>0,58</b>
3,86	50,4	30	0,09	<b>0,09</b>	0,16	<b>0,16</b>	0,45	<b>0,42</b>
3,86	50,4	45	0,13	<b>0,11</b>	0,21	<b>0,21</b>	0,60	<b>0,55</b>
3,86	50,4	60	0,17	<b>0,14</b>	0,26	<b>0,26</b>	0,86	<b>0,68</b>
3,86	71,7	30	0,10	<b>0,12</b>	0,22	<b>0,22</b>	0,55	<b>0,58</b>
3,86	71,7	45	0,15	<b>0,15</b>	0,28	<b>0,28</b>	0,86	<b>0,73</b>
3,86	71,7	60	0,20	<b>0,18</b>	0,33	<b>0,33</b>	1,06	<b>0,86</b>

Prema prikazanom modelu laboratorijski uzorak frakcije se ispituje te pomoću prikazanih jednadžbi dovodi se u vezu umanjena vlažnost spram debljine promatranog sloja.

### 7.3. Sumarni pregled dobivenih rezultata ispitivanja

U tablici 7-24 prikazani su svi rezultati frakcija kamenih materijala matematičkim jednadžbama.

Tablica 7-24: Matematički prikaz jednadžbi frakcija

Frakcija	Osnovna jednadžba [%]	Temperaturni koeficijent, $\alpha$	Koeficijent brzine, $\beta$
0/2	$w_{0/2} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0033t + 0,015)$	$\alpha = 0,6348e^{0,0137T}$	$\beta = 0,2485 \cdot v - 0,0002$
2/4	$w_{2/4} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0077t - 0,08)$	$\alpha = 0,6611e^{0,0126T}$	$\beta = 0,241 \cdot v + 0,1056$
4/8	$w_{4/8} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,004t + 0,043)$	$\alpha = 0,5961e^{0,0149T}$	$\beta = 0,1697 \cdot v + 0,3396$
8/11	$w_{8/11} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,0043t + 0,07)$	$\alpha = 0,6787e^{0,012T}$	$\beta = 0,0185 \cdot v + 0,9319$
0/11RA	$w_{0/11RA} = \alpha \cdot \beta \cdot (0,006t - 0,043)$	$\alpha = 0,62e^{0,0159T}$	$\beta = 0,2081 \cdot v + 0,2291$

Definirana je ovisnost debljine ispitivanog sloja sa pripadajućom vlažnošću koja je prikazana u tablici 7-25.

Tablica 7-25: Matematički prikaz jednadžbi debljine sloja

Frakcija	Osnovna jednadžba [%]	Koeficijent debljine sloja, $\gamma$
0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 0/11RA	$w_u = w_{d/D} \cdot \gamma$	$\gamma = 2,6143h^{-0,884}$

U tablici 7-26 prikazani su samo koeficijenti pripadajućih jednadžbi. Sređivanjem jednadžbi prikazanih u tablicama 7-24 i 7-25 dobiva se konačna jednadžba prikazana u 7.29.

Tablica 7-26: Prikaz koeficijenata osnovnih jednadžbi

Frakcija	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>
0/2	0,0033	0,0155	0,6348	0,0137	0,2485	-0,0002
2/4	0,0077	-0,085	0,6611	0,0126	0,2410	0,1056
4/8	0,004	0,0433	0,5961	0,0149	0,1697	0,3396
8/11	0,0043	0,075	0,6787	0,0121	0,0185	0,9319
0/11RA	0,006	-0,0433	0,6200	0,0159	0,2081	0,2291

$$w_{u,d/D} = 2,6143 \cdot h^{-0,884} \cdot (k_1 \cdot t + k_2) \cdot (k_3 \cdot e^{k_4 \cdot T}) \cdot (k_5 \cdot v + k_6) \quad [\%] \quad (7.29)$$

gdje su:

$w_{u,d/D}$  – rezultat umanjene vlažnosti izračunavane frakcije, [%]

$h$  – debljina sloja, [cm]

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ , - koeficijenti pripadajućih frakcija

$t$  – vrijeme, [s]

$T$  – temperatura, [°C]

$v$  – brzina strujanja zraka, [m/s].

Na prikazanoj konačnoj jednadžbi sada se mogu modelirati i simulirati umanjene vlažnosti s različitim ulaznim parametrima: brzina strujanja zraka, temperatura ili različito vrijeme, sve u ovisnosti od promatrane debljine sloja.

Izračunavanje vlage prikazane u jednadžbi 7.29 vrijedi samo za jednu odabranu frakciju, npr. 0/2. Tada se postupak ponavlja za drugu frakciju i tako redom. Treba znati da se ukupna vrijednost smanjenja vlage na asfaltnoj bazi iskazuje kao harmonijska sredina. Harmonijska sredina je recipročna vrijednost aritmetičke sredine recipročnih vrijednosti za koje se sredina izračunava. Harmonijska sredina prikazana je u izrazu 7-30.

$$w_u = \frac{n}{\frac{1}{w_{d_1/D_1}} + \frac{1}{w_{d_2/D_2}} + \frac{1}{w_{d_3/D_3}} + \dots + \frac{1}{w_{d_n/D_n}}} \quad (7.30)$$

## 7.4. Prionjivost agregata i bitumena

Prilikom ispitivanja agregata za potrebe kontrole tvorničke proizvodnje, između ostalih potrebnih ispitivanja prema produktivnoj normi, jedno od svojstava za ispitivanje je prionjivost agregata i bitumena, a koje se provodi prema normi HRN EN 12697-11:2012 [82]. Ovim ispitivanjem se dokazuje kompatibilnost između agregata i bitumena. Potrebno je odrediti postotak prijanjanja bitumena na agregat.

Kod proizvodnje asfaltnih mješavina postoji mogućnost onečišćenja agregata s ispušnim plinovima odnosno izgorivim tvarima (npr. parafin). Onečišćenje i njegov utjecaj ovisi o tome kojim resursima (prirodni plin, diesel, prašina smeđeg ugljena, itd.) se proizvodi asfaltna mješavina te o ispravnosti rada postrojenja asfaltne baze.

U okviru ovog rada provedeno je ispitivanje prionjivosti agregata i bitumena kod kontaminacije agregata ispušnim plinovima koji su dobiveni izgaranjem prirodnog plina. Pripremljena su tri uzorka koji su u različitim vremenskim intervalima bila izložena djelovanju ispušnih plinova.

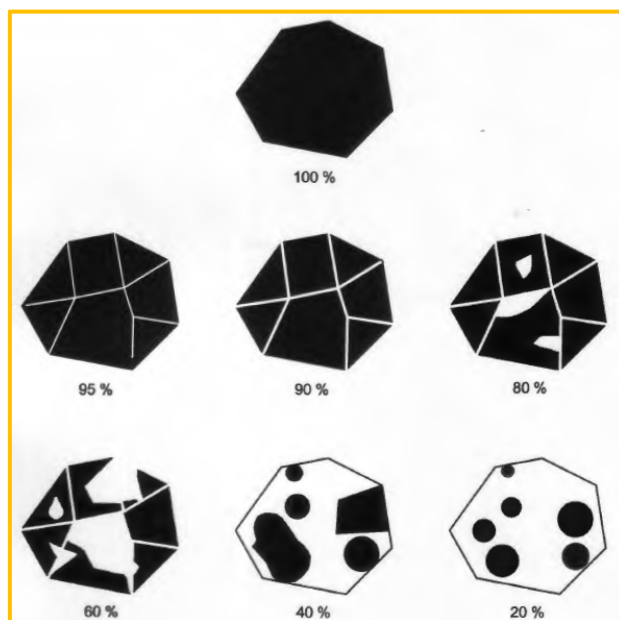
Postupak ispitivanja je vizualna ocjena ispitivača kojom se procjenjuje obavijenost bitumena oko agregata. Ispitivanje se provodi u slijedećim fazama: prvo je potrebno pripremiti uzorak agregata 8/11 te ga oprati. Sušenje se odvija na  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  do konstantne mase. Uzima se uobičajeni bitumen koji se inače koristi u proizvodnji asfaltnih mješavina (npr. cestograđevni bitumen 50/70). Temperatura miješanja agregata i bitumena je određena tipom bitumena. Zagrije se agregat na potrebnu temperaturu i održava se temperatura minimalno 3 sata. Na pripremljenu frakciju 8/11 dodaje se  $16 \pm 0,2$  g bitumena. Za točno doziranje bitumena koristi se stvarna gustoća korištenog agregata kojim se dobiva korekcijski faktor putem jednadžbe:

$$\alpha = \frac{2,65 \text{ Mg/m}^3}{\text{gustoca agregata Mg/m}^3}$$

Miješanje se odvija tako dugo dok se u potpunosti sva zrna ne omotaju bitumenom. Tada je potrebno brzo sipati mješavinu na podlogu i razdvojiti zrna. Takvu mješavinu skladištiti između 12 i 64 sata na temperaturi od  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  u prostoriji bez prašine i izlaganja direktnom suncu.

Razdvojiti mješavinu u tri poduzorka gdje svaki ima  $150 \pm 2$  g. Označiti boce i popuniti ih do polovice njihovog volumena destiliranom vodom temperature  $5 \pm 2^\circ\text{C}$ . Boce napuniti i mješavinom te ih staviti na vrtnju koje mora biti brzinom koja ovi o timu bitumena. Ako je

bitumen veće penetracije od 100 1/10 mm na 25°C tada brzina vrtnje boca iznosi  $40 \text{ min}^{-1} \pm 10\%$ . Ako je penetracija manja tada brzina iznosi  $60 \text{ min}^{-1} \pm 10\%$ . Izvođenje ispitivanja mora se provoditi na temperaturi prostorije od 15°C do 25°C bez prisustva direktnog sunčevog sjaja. Rolanje završava nakon  $6 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ . Izlije se voda iz boce u posudu i izvadi se mješavina koja se stavi u drugu bocu s svježom destiliranom vodom do visine nešto malo iznad najvišeg zrna. Boca se stavi na bijelu podlogu te se vizualno promatra i bilježi obavijenost zrna. Potom se iz boce izlije voda i uzorak koji se stavi u bocu u kojoj se uzorak vrtio te se napuni boca s već korištenom vodom iz posude. Nakon toga se ponavlja postupak rada poslije  $24 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ . Poslije svakog vremena se vizualno ocjenjuje obavijenost bitumena oko agregata. Svaku vizualnu ocjenu daju dva ispitivača te se bilježi srednja vrijednost. Kao pomoć u ocjenjivanju dan je primjer obavijenosti agregata i bitumena prikazan na slici 7-18 [82], [83].



Slika 7-18: Stupanj prionjivosti agregata i bitumena [79]

Rezultati ispitivanja uzoraka dani su u tablici 7-27.

Tablica 7-27: Rezultati ispitivanja prionjivosti bitumena i agregata

Oznaka uzorka	Rezultat nakon 6 h [%]	Rezultat nakon 24 h [%]
Uzorak - 30 s	90	70
Uzorak - 60 s	95	70
Uzorak - 180 s	90	70
Kontrolni uzorak	90	70

Rezultati ispitivanja prikazani u tablici su podjednaki. Uzorak oznake „30 s“ označava da je uzorak bio 30 s podvrgnut utjecajima ispušnih plinova. Tako i ostale oznake označavaju određeni broj sekundi opterećenja utjecajima štetnih plinova. Kontrolni uzorak je uzorak koji nije bio podvrgnut nikakvim onečišćenjima ispušnih plinova.

Možemo konstatirati prema prikazanim rezultatima da prilikom pravilnog izgaranja prirodnog plina nema nikakvih štetnih posljedica za prionjivost agregata i bitumena. Kod ispravnog načina rada postrojenja asfaltne baze nema neželjenih posljedica vezanih za kontaminaciju agregata odnosno prionjivost između agregata i bitumena. Prilikom rada s nekim drugim gorivom kod proizvodnje asfaltnih mješavina, utjecaj ispušnih plinova potrebno je dokazati.



*Slika 7-19: Uzorak nakon 6 sati ispitivanja prionjivosti agregata i bitumena*

## 7.5. Mogućnost primjene koncepta na postrojenju asfaltne baze

S obzirom da prema rezultatima ispitivanja kratkotrajnim izlaganjem kamenog agregata strujanju vrućeg zraka dolazi do umanjjenja vlažnosti materijala ovaj koncept može se smatrati primjenjivim. Trakastu sušaru moguće je pridodati na traku kojom materijal putuje u rotacijski bubanj. U trakastoj sušari kameni materijal bi prilikom putovanja beskonačnom trakom u određenom vremenu izgubio bi određeni dio vlažnosti (umanjena vlažnost). Slika 7-20 prikazuje kosu traku na asfaltnoj bazi.



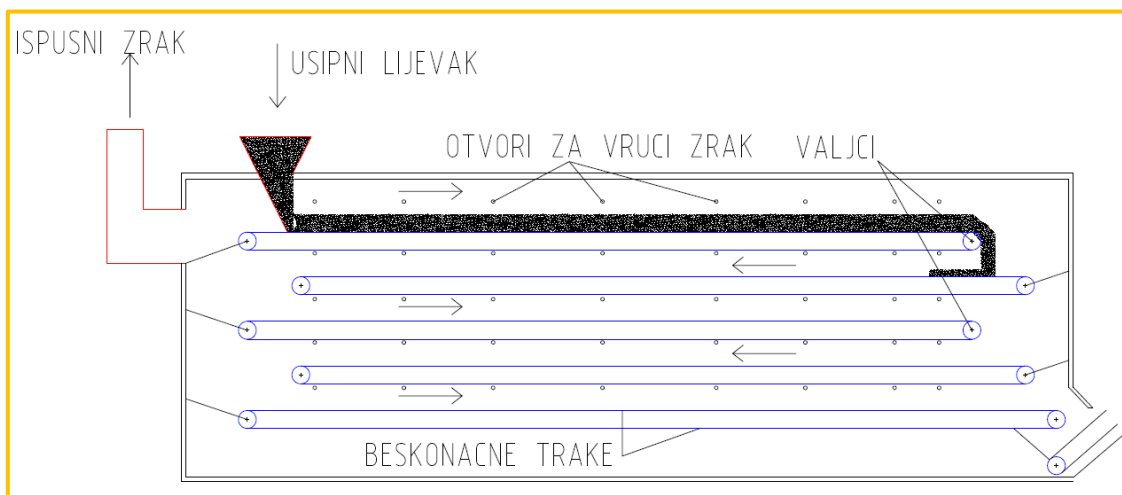
*Slika 7-20: Kosa transportna traka na asfaltnoj bazi*



Slika 7-21 prikazuje položaj na kojem bi se smjestila trakasta sušara. Na slici 7-22 prikazani je shematski model trakaste sušare.



Slika 7-21: Shematski prikaz smještaja trakaste sušare na asfaltnoj bazi (umjesto kose trake) [44]



Slika 7-22. Shematski prikaz trakaste sušare [45]

Trakasta sušara bi imala funkciju smanjivanja vlažnosti materijala koji se koristi pri izradi asfaltnih mješavina. Takvu sušaru bilo bi potrebno izraditi za svaku asfaltnu bazu posebno ovisno o njezinom modelu i kapacitetu. Bitno je da kameni materijal unutar sušare može provesti što više vremena, te na što višoj dostupnoj temperaturi, a pri tome je potrebno pažnju usmjeriti na moguće gubitke temperature prilikom dovođenja toplog zraka iz dimovoda

do sušare. Brzina kose trake iznosi oko 6,12 km/h (1,7 m/s), što ovisi o modelu asfaltne baze. Duljina kose trake je oko 22 m (u AB Motičnjak COLAS Hrvatska d.d.). Unutar te duljine bilo bi potrebno omogućiti da kameni materijal bude izložen strujanju vrućeg zraka u vremenu od oko 65 s.

## 8. ZAKLJUČCI

U posljednje vrijeme brojni istraživači radili su na mjerenjima utroška energije u proizvodnji asfaltnih mješavina. Takva mjerenja doprinijela su tehnološkom unaprjeđenju ključnih dijelova asfaltne baze, kao što su rotacijski bubanj za sušenje i plamenik. Poseban naglasak u istraživanjima stavljen je na fazu pripreme agregata i ocjenu mogućnosti i stupnja ušteda koje se mogu ostvariti smanjenjem vlažnosti agregata prije ulaska u rotacijski bubanj. Ovaj rad baziran je na dosadašnjim spoznajama, iznalaženju mogućnosti smanjenja i istraživanjima potrebne energije za proizvodnju vrućih asfaltnih mješavina. Činjenica je da se toplina ispušta kroz dimovodnu cijev asfaltne baze. Ovdje je potrebno samo tu energiju koja se sastoji od brzine i temperature preusmjeriti na početak proizvodnje. Stoga se pristupilo izradi laboratorijskog modela opreme koji je simulirao uvjete kakvi se ostvaruju na asfaltnoj bazi.

Sastav ispušnih plinova sa asfaltne baze podliježu ispitivanjima kao i protok, krute čestice te temperatura. Takvom analizom potvrđena je početna hipoteza kako se tijekom proizvodnog procesa u atmosferu ispušta velika količina toplinske energije. Prikazana su mjerenja na četiri asfaltne baze čime je ujedno definiran i raspon ulaznih parametara prilikom izrade laboratorijskih ispitivanja. Staklenički plin CO<sub>2</sub> potrebno je staviti pod nadzor na globalnoj razini. Za proizvodnju 1 tone asfaltne mješavine dodatno se stvori od 13,76 kg do 25,80 kg CO<sub>2</sub>. Taj raspon ovisi o korištenim energentima za proizvodnju asfaltne mješavine.

Hipoteza se sastoji u tome da energija koja putem dimovodnih cijevi izlazi u okoliš se preusmjeri na proces preosušenja agregata kod proizvodnje asfaltnih mješavina. To bi se odvijalo u trakastoj sušari koja je smještena prije rotacijskog bubnja za sušenje agregata. Cilj ove trakaste sušare je u tome da se agregat što dulje nalazi u njoj, a time se ujedno i više vlage u agregatu smanji.

Laboratorijska oprema korištena kod ovog ispitivanja podređena je uvjetima koje je moguće postići kod proizvodnje asfaltnih mješavina. Osnovni parametri su brzina strujanja zraka, temperatura i vrijeme. Ispitivanja su provedena sa različitim kombinacijama nabrojanih parametara. Ispitivane su različite frakcije agregata: 0/2, 2/4, 4/8, 8/11 i 0/11RA.

Iz prikazanih rezultata ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

- 1) Vrijeme je jedan od ključnih faktora, iz razloga što je proizvodnja asfaltnih mješavina brz i kontinuiran proces. Doziranja komponentni agregata i miješanja istih s vezivom izraženo je u sekundama. Ovdje se radi o vremenima izraženim u sekundama koje pri temperaturama raspona od 30°C do 100°C agregat izgubi postotak svoje vlažnosti. Može se napomenuti da se to vrijeme uvijek može produžiti, čime bi se u konačnici, prikazanim rezultatima iz provedenih ispitivanja, moglo dokazati kako se gubitak vlažnosti može još povećati. Produljene vremena se odnosi na trakastu sušaru, koja bi imala više nivoa, odnosno u kojoj bi se agregat duže zadržao. Ovim produljenjem vremena početak proizvodnje asfaltnih mješavina bi se za toliko pomaknuo.
  
- 2) Temperatura je drugi ključan faktor. Iz ispitivanja je vidljivo da je sa porastom temperature smanjen udio vlažnosti agregata. Iz dosadašnje prakse načina proizvodnje asfaltnih mješavina proizvodne temperature kreću od minimalnih 110°C na više. To također proizlazi iz činjenice da se sušenje agregata mora događati na višim temperaturama iz razloga isparivanja vode iz agregata. Pri svim nižim temperaturama teže je ispariti svu vodu iz kamena, a ujedno potrebno vrijeme sušenja se povećava. Kada se i koriste tehnologije smanjivanja temperatura kod proizvodnje asfaltnih mješavina uvijek je poznata vrsta veziva koja se koristi, odnosno koja je to optimalna temperatura veziva (bitumena). Kada se u rotacijskom bubnju za sušenje ne postiže dovoljna temperatura za sušenje tada se po stjenkama tog bubnja hvata agregat. Zaključuje se da iz svih nabrojanih stvari proizlazi da je temperatura ključna za ovaj tehnološki proces. Tako da, način iskorištenja te temperature koja proizlazi iz rotacijskog bubnja dalje u sustav proizvodnje i njezin prihvata da li na mjestu odmah iza vrećastih filtera ili na nekom drugom pogodnom mjestu dolazi do izražaja. Agregat koji proizlazi iz trakaste sušare osim što mu je smanjena vlažnost on ima i svoju određenu temperaturu koju poprima prilikom faze sušenja. Poznata je činjenica da je i temperatura ulaznog agregata u proces proizvodnje jedan od faktora koji utječu na smanjenje energije prilikom proizvodnje.
  
- 3) Brzina strujanja zraka određene temperature kao treći faktor je ustvari posljedica kinetičkog procesa dovođenja temperature. Ovdje je vidljiva tendencija udjela šupljina između zrna agregata, kada su šupljine veće tada topli zrak može doprijeti do svih dijelova zrna agregata nego kad su šupljine između agregata manje. S time da je

potrebno naglasiti da u slučaju prevelikih brzina dolazi do podizanja sitnog agregata, a to je neželjeni efekt. Stoga je potrebno kontrolirati strujanje zraka. Frakcije agregata zrna manjih od 4 mm imaju veliku vlagu zbog površine zrna u jediničnom volumenu, nego što je to u slučaju većih zrna agregata npr. bilo koje krupne frakcije.

Posebno je promatran slučaj debljina sloja agregata. Kako se agregat u trakastoj sušari kreće po beskonačnim trakama, tu je također analiziran utjecaj smanjenja udjela vlažnosti agregata. Promatrani uzorci bili su iste ispitne površine, ali različitog volumena. Tako se može zaključiti da je debljina sloja agregata usko povezana sa strujanjem zraka između zrna. Vidljivo je da se s povećanjem debljine sloja dobivaju manje vrijednosti smanjenja vlage u agregatu.

Ispitivanja na frakciji 0/11 RA provedena su iz razloga sve većeg korištenja reciklažnih asfaltnih agregata u proizvodnji asfaltnih mješavina. Kod većih vlažnosti tog agregata nastaju problemi u proizvodnji. Jedna od mjera kod korištenja reciklažnog asfaltnog agregata je predušenje istog. To je od posebnog značaja jer u nekim slučajevima kad se takav materijal dodaje direktno u miješalicu potrebno je podići temperaturu proizvodnje iznad 200°C. Prije smo već spomenuli da je jedan od osnovnih uvjeta gotovog proizvoda temperatura prema korištenom tipu veziva. Proizvodnja asfalta sa dodatkom reciklažnog asfaltnog agregata je gotovo tijekom cijele godine. Kako je u jesenskim i zimskim mjesecima tendencija oborina veća, a pri tome su vanjske temperature manje, ovdje tek dolazi do izražaja predušenje agregata. Iz prikazanih ispitivanja je vidljivo povećano umanjevlje vlage te vrste materijala. To je iz razloga što se u porama agregata nalazi vezivo (bitumen) a manje ima vode. Stoga je agregat najviše površinski obavijen vlagom. Predušanjem agregata ta se površinska vlažnost smanjuje i dobiva se pogodniji materijal za proizvodnju. Kako je već spomenuto u radu, granica za korištenje ovog agregata je 3% a ispitivanjima se dokazalo da se može smanjiti vlaga od čak 1%, što daje za činjenicu da agregat koji na deponiji ima 4% vlažnosti sa uključenim predušenjem se može nesmetano koristiti. U ljetnim mjesecima je to pogodnije jer prilikom oborina agregat se vlaži površinski te se također putem predušenja smanjuje vlažnost i može se koristiti tim prije jer su i temperature ljeti više.

Dobivenim i prikazanim rezultatima matematičkom obradom podataka dodijeljene su jednadžbe i prikazane krivulje toka. Ujedno je načinjena i usporedba mjerenih rezultata sa matematičkim modelom te je prikazana pogreška modela. Daljnjim matematičkim obradama

dobivena je jedna jedinstvena jednadžba izračunavanja smanjenja vlage u agregatu. Primjenom takve jednadžbe određuje se postotak smanjenja vlažnosti. Jedinstvena jednadžba smanjenja vlažnosti u agregatu glasi:

$$w_{u,d/D} = 2,6143 \cdot h^{-0,884} \cdot (k_1 \cdot t + k_2) \cdot (k_3 \cdot e^{k_4 \cdot T}) \cdot (k_5 \cdot v + k_6) [\%]$$

Provedeno je kontrolno mjerenje prionjivosti agregata i veziva (bitumena). Ovim ispitivanjem dokazalo se da ispušni plinovi nemaju utjecaja na vezanje agregata i bitumena. Time se odbacuje mogućnost da ispušni plinovi s asfaltne baze štete proizvodnji asfaltnih mješavine te da se ne bi mogli koristiti u sistemu predsušenja agregata u trakastoj sušari.

Vidljivo je da na povećanje umanjene vlažnosti doprinose ulazna vlažnost agregata, temperatura djelovanja, brzina strujanja zraka, vrijeme ispitivanja te debljina sloja. Utjecajima tih čimbenika i njihovom kombinacijom dobivene su vrijednosti smanjenja. Frakcija agregata do 2 mm ima raspon vrijednosti umanjene vlažnosti od 0,12% do 1,16%, frakcija agregata od 2 mm do 11 mm ima raspon umanjene vlažnosti od 0,15% do 1,01%, dok srednja vrijednost umanjene vlažnosti reciklažnog asfaltnog agregata iznosi 0,46% i kreće se u rasponu od 0,15% do 1,01%.

## 9. LITERATURA

- [1] Roberts, F.L. i dr. Vruće asfaltne mješavine: materijali, projektiranje i ugradnja, Hrvatski savez građevinskih inženjera: Institut građevinarstva Hrvatske, 2003
- [2] Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., Izvori i gospodarenje energijom u industriji, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Element, Zagreb 2013.
- [3] Internetska stranica [http://www.crodux-plin.hr/?page\\_id=11](http://www.crodux-plin.hr/?page_id=11) (18.05.2014.)
- [4] Internetska stranica [http://www.izvorienergije.com/prirodni\\_plin.html](http://www.izvorienergije.com/prirodni_plin.html) (13.02.2017.)
- [5] Hrnčević, L., Dekanić, I., Karasalihović Sedlar, D., Analiza sigurnosti opskrbe prirodnim plinom u Hrvatskoj. Energija, 57(2008), 6, 600-609
- [6] Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske (NN 130/09)
- [7] Pravilnik o općim uvjetima opskrbe plinom (NN 158/13) <https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/429819.pdf> (13.02.2017.)
- [8] Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 117/12) [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2017\\_08\\_87\\_2073.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2017_08_87_2073.html) (13.02.2017.)
- [9] Pravilnik o praćenju emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 129/12) [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012\\_11\\_129\\_2760.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_11_129_2760.html) (19.05.2014.)
- [10] Pavić-Rogošić, L. Održivi razvoj, 2010., <http://odraz.hr/hr/nase-teme/odrzivi-razvoj> (19.05.2014)
- [11] Mujumdar A.S. An overview of innovation in industrial drying: Current status and R&D needs February 2007 Transport in Porous Media 66(1):3-18 doi: 10.1007/s11242-006-9018-y
- [12] Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes, European Asphalt Pavement Association, EAPA, [http://www.eapa.org/usr\\_img/position\\_paper/bat\\_update\\_version2007.pdf](http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/bat_update_version2007.pdf) (18.05.2017.)
- [13] Chappat M, Bilal J. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. Colas Group. 2003. <http://www.colas.com/FRONT/COLAS/upload/com/pdf/route-future-english.pdf> (12.05.2017.)
- [14] Jullien A., Gaudefroy V., Ventura A., de la Roche C., Paranhos R., Monéron P. Airborne Emissions Assessment of Hot Asphalt Mixing - Methods and Limitations.

- Road Material and Pavement Design 2010; 11 (1), 149-169.  
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/14680629.2010.9690264> (2.06.2017.)
- [15] Young, T.J. 2008. Energy Analysis for Hot Mix Plants. Rev 020309/Permission of Use Required. Technical training and advisory services company.
- [16] Grabowski, W.; Janowski, L. 2010. Issues of Energy Consumption during Hot Mix Asphalt (HMA) Production, in Proc. of the 10th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques": selected papers. May 19-21, 2010, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 89-92 (14.06.2017.)
- [17] Ang BW, Fwa TF, Ng TT. 1993. Analysis of process energy use of asphalt-mixing plants. Energy 18 (7): 769-777. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(93\)90035-C](https://doi.org/10.1016/0360-5442(93)90035-C)
- [18] Jenny, R. 2009. CO<sub>2</sub> Reduction on Asphalt Mixing Plants Potential and Practical Solutions. Amman-Group, Switzerland
- [19] Proizvodnja asfalta u Hrvatskoj i Europi u 2017. <https://www.h-a-d.hr/proizvodnja-asfalta/https://www.h-a-d.hr/proizvodnja-asfalta/2017/g58> (18.06.2018)
- [20] Muench S.T., Roadway Construction Sustainability Impact - Review of Life-Cycle Assessments. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, 2010; No. 2151, 36-45. doi: 10.3141/2151-05  
<http://courses.washington.edu/cee500e/Files/Muench--final%20article.pdf> (18.06.2015.)
- [21] Peinado D, de Vega M, García-Hernando N, Marugán-Cruz C. 2011. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. Applied Thermal Engineering 31(6): 1039-1049 <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.029> (3.07.2015.)
- [22] Sivilevicius H. 2011. Application of Expert Evaluation Method to Determine the Importance of Operating Asphalt Mixing Plant Quality Criteria and Rank Correlation. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 6(1): 48-58. doi: 10.3846/bjrbe.2011.07
- [23] Androjić, I. Model optimalizacije utroška energenata u procesu proizvodnje vrućih asfaltnih mješavina na asfaltnim postrojenjima cikličnog tipa (2013), doktorska disertacija, 244 str. Građevinski fakultet Osijek, Osijek.  
<https://repozitorij.gfos.hr/islandora/object/gfos%3A178>
- [24] Androjić, I., Dolaček-Alduk, Z. Analysis of energy consumption in the production of hot mix asphalt (batch mix plant). Canadian journal of civil engineering. 43 (2016) , 12; 1044-1051. doi: <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0277>



- [25] Simons, Technical paper T-129: Stockpiles, Astec Industries, pp. 1-18.  
[https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/tecnologia\\_hormigon/T-129\\_Stockpiles.pdf](https://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/T-129_Stockpiles.pdf)
- [26] Grabowski W, Janowski L, Wilanowicz J. Problems of energy reduction during the hot-mix asphalt production, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2013. 8 (1) 40-47. doi: 10.3846/bjrbe.2013.06
- [27] Cimbola, Z., Dolaček-Alduk, Z., Dimter, S. Possibilities of energy savings in hot-mix asphalt production, *Road and Rail Infrastructure IV*, Lakušić, S. (ur.). Zagreb: Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2016. 667-673.
- [28] Androjić, I., Kaluđer, G., Usage of solar aggregate stockpiles in the production of hot mix asphalt *Applied thermal engineering* (1359-4311) 108 (2016), 5; 131-139. 9  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.089>
- [29] Androjić, I., Marović, I., Kaluđer, G., Androjić, J. Application of solar aggregate stockpiles in the process of storing recycled materials. *International journal of energy research*. 2018 (2018) , 57; 1-14. <https://doi.org/10.1002/er.4317>
- [30] Cimbola, Z., Dolaček-Alduk, Z. Managing Thermal Energy of Exhaust Gases in the Production of Asphalt Mixtures. *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*, 25 (2018), 2; 444-451 doi:10.17559/TV-20180313124037
- [31] European Asphalt Pavement Association (2010) The Use of Warm Mix Asphalt. EAPA position paper-January 2010. [www.eapa.org](http://www.eapa.org) (16.9.2017.)
- [32] Rubio, M.C., Martinez, G., Baena, L., Moreno, F. Warm mix asphalt: an overview, *Journal of Cleaner Production* 24 (2012) 76-84. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.053
- [33] Prowell, B.D., Hurley, G.C., Crews, E. Field performance of warm-mix asphalt at national center for asphalt technology test track. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1998.1 (2007): 96-102
- [34] Guo, N., You, Z., Tan, Y., Zhao, Y. (2017) Performance evaluation of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt mixtures, *International Journal of Pavement Engineering*, 18:11, 981-989, doi: 10.1080/10298436.2016.1138114
- [35] Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L.T., Yunus, R., Solouki, A. 2014. An overview of the emerging warm mix asphalt technology. *International Journal of Pavement Engineering* 15 (1), 79-94.

- [36] Davidson J.K. Warm asphalt mix technology, an overview of the process in Canada. In Proceedings of 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2008. Polyscience Publications Inc., Laval, Quebec, Canada.
- [37] D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J. et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. Technical Report No. FHWA-PL-08-007 2008, Office of International Programs, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA  
[http://www.warmmixasphalt.com/submissions/68\\_20080223\\_FHWA-PL-08-007.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/68_20080223_FHWA-PL-08-007.pdf)
- [38] Hassan M. Life-cycle assessment of warm-mix asphalt: An environmental and economic perspective. In Proceedings of Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Transportation Research Board, 2009. Washington, DC, USA
- [39] Vaitikus, A., Čygas, A., Laurinavičius, A., Perveneckas, Z. 2009. Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(2), 80-86
- [40] Middleton B., Forfylo B. An evaluation of warm mix asphalt produced with double barrel green process, 7th International Conference on Managing Pavement Assets, 2008.  
<http://pavementmanagement.org/ICMPfiles/2008005.pdf>
- [41] Zaumanis, M. Warm Mix Asphalt Investigation. 2010. (Science Thesis available on [http://www.warmmixasphalt.com/submissions/117\\_20100630\\_M.Zaumanis\\_WMA\\_Master\\_thesis.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/117_20100630_M.Zaumanis_WMA_Master_thesis.pdf))
- [42] You, Z., and Goh, S., 2008, "Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt: A Preliminary Study", International Journal of Pavement Research and Technology, 1(1):34-40.
- [43] Khandhal, P. S., 2010. "Warm Mix Asphalt Technologies: An Overview," Journal of the Indian Road Congress, IRC, 71(2), pp. 143-152.
- [44] Rubio, M.C., Moreno, F., Martinez-Echevarria, M.J., Vazquez, J.M. 2013. Comparative analysis of emissions from manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. Journal of Cleaner Production 41, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>
- [45] Costa, A., Benta, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, Journal of Cleaner Production (2015) 112(Part 4):Pages 2308-2317 doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.077
- [46] Kamarudin S.N.n. et al 2018. Comparison of Performance between Hot and Warm Mix Asphalt as Related to Compaction Design, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1049 (2018) 012036 doi :10.1088/1742-6596/1049/1/012036

- [47] Romier, A., Audeon, M, David, J,m Martineau, Y., Olard, F. 2006. Low-energy asphalt with performance of hot-mix asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1962, 101-112. <https://doi.org/10.3141/1962-12>
- [48] Rukavina, T.; Dragčević, V.; Ožbolt, M. Posebne asfaltne mješavine, *Dani prometnica* 2008, Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti / Lakušić, S. (ur.). Zagreb : Denona d.o.o., 2008. Str. 87-144.
- [49] Androjić, I., Dimter, S. Influence of compaction temperature on the properties of Marshall specimens, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. X (2015) , 4; 309-315. doi: 10.3846/bjrbe.2015.39
- [50] Lee, S.-J.; Amirkhanian, S.N.; Shatanawi, K., Thodesen, C. 2008a. Influence of compaction temperature on rubberized asphalt mixes and binders, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.35, No.9:908-917, doi:10.1139/L08-045
- [51] Lee, S.-J.; Amirkhaniana, S. N.; Kwonb, S.-Z.; 2008b. The effects of compaction temperature on CRM mixtures made with the SGC and the Marshall compactor, *Construction and Building Materials* Vol. 22 (6):1122–1128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.003
- [52] Li, P.; Ding, Z.; Zhang, Z. 2013. Effect of Temperature and Frequency on Visco-Elastic Dynamic Response of Asphalt Mixture, *Journal of Testing and Evaluation* 41(4): 571–578.; doi:10.1520/JTE20120044
- [53] Park, D.-W.; Kim, I.-T. 2013. Thermal Properties of Permeable Friction Asphalt Mixture and Estimation of Temperature Profiles, *International Journal of Pavement Engineering*, 14(7–8): 752–759. doi:10.1080/10298436.2012.715645.
- [54] West, R.C.; Watson, D.E.; Turner, P.A.; Casola, J.R. 2010. Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt, *Transportation Research Board*, NCHRP Report 648, Washington, D.C
- [55] Vlastita dokumentacija, interni zapisi, ispitivanja i fotodokumentacija tvrtke COLAS Hrvatska d.d.
- [56] Jenkins, K.J., Molenaar, A.A.A., de Groot, J.L.A., van de Ven, M.F.C. Developments in the uses of foamed bitumen in road pavement, *HERON*, vol.45. No 3(2000) pp 167-176, ISSN 0046-7316
- [57] Lacković, V., Cimbola, Z., Hojsak, T., Primjena aditiva bitumenu tipa CWM u Hrvatskoj, *Ceste i mostovi*, glasilo hrvatskog društva za ceste – VIA VITA, br. 4-6, srpanj/prosinac 2009.

- [58] Software „QColas“ izvorno autorsko <http://www.colassolutions.ca/bitucclair>  
(17.08.2014.)
- [59] HRN EN 13108-8:2007 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 8. dio: Reciklažni asfaltni agregat*
- [60] Dimter, S., Androjić, I. Primjena recikliranog asfalta u proizvodnji asfaltnih mješavina, EU fondovi i projekti prometne infrastrukture / Stjepan Lakušić (ur.), Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2014. str. 237-268.
- [61] Huges, C.S. Design, Construction, and Performance of Heavy Duty Mixes, NAPA, 2002. <http://www.asphaltinstitute.org/dotAsset/cbd6f24d-d953-4e09-8dce-dfcd6f8fdce9.pdf> (18.08.2014.)
- [62] HRN EN 13284-1 *Određivanje niskih razina masenih koncentracija prašine - 1. dio: Ručna gravimetrijska metoda*
- [63] HRN EN 13108-20:2016 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 20. dio: Ispitivanje tipa*
- [64] HRN EN 13108-21:2016 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 21. dio: Tvornička kontrola proizvodnje*
- [65] Asfaltne baze u Hrvatskoj, <https://www.h-a-d.hr/asfaltne-baze-u-hrvatskoj/baze/>  
(08.06.2016.)
- [66] HRN EN 13108-1 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 1. dio: Asfaltbeton*
- [67] HRN EN 13108-2 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 2. dio: Asfaltbeton za vrlo tanke slojeve*
- [68] HRN EN 13108-5 *Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - 5. dio: SMA*
- [69] Proizvodnja asfalta u Hrvatskoj i Europi -2017, <https://www.h-a-d.hr/proizvodnja-asfalta/https://www.h-a-d.hr/proizvodnja-asfalta/2017/g58> (15.06.2017.)
- [70] Internetska stranica [http://www.ammann-group.com/fileadmin/ammann/bilder/Technologie/08\\_trommel.jpg](http://www.ammann-group.com/fileadmin/ammann/bilder/Technologie/08_trommel.jpg) (13.02.2017.)
- [71] Agencija za zaštitu okoliša, Priručnik za vođenje registra onečišćavanja okoliša, Tiskara HIP, Zagreb, lipanj 2008.
- [72] Agencija za zaštitu okoliša, Dodatak A – Ispuštanja u zrak, Tiskara HIP, Zagreb, lipanj 2008.
- [73] Ologun O.O et al., Carbon Footprint Evaluation and Reduction as a Climate Change Mitigation Toll – Case Study of Federal University of Agriculture Abeokuta, Ogun State, Nigeria, International Journal of renewable energy research, Vol. 4, No 1, 2014.

- [74] Trees of Strength <https://projects.ncsu.edu/project/treesofstrength/treefact.htm>  
(15.08.2014.)
- [75] Izvješće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990.-2010., Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Agencija za zaštitu okoliša, lipanj 2012.
- [76] HRN EN 1097-5:2008 *Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilirajućem sušioniku*
- [77] Prvulović, S. Modelovanje mehanizma prenosa toplote pri konvektivnom sušenju i utvrđivanje numeričkih pokazatelja, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, Zrenjanin, 2004.
- [78] HRN EN 932-1:2003 *Ispitivanje općih svojstava agregata - 1. dio: Metode uzorkovanja*
- [79] HRN EN 932-2:2003 *Ispitivanje općih svojstava agregata - 2.dio: Metode smanjivanja laboratorijskih uzoraka*
- [80] HRN EN 1097-6:2013 *Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode*
- [81] HRN EN 1097-3:2004 *Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 3. dio: Određivanje nasipne gustoće i šupljina*
- [82] HRN EN 12697-11:2012 *Određivanje prionjivosti bitumena i agregata*
- [83] Izvještaj o ispitivanju prionjivosti agregata i bitumena br. I-2017-50, Ramtech d.o.o.,  
(13.02.2017.)



## Curriculum vitae

### Osobne informacije

Ime i prezime	Zdravko Cimbola
Adresa	Nova 14, Pušćine 40305 Nedelišće
Mobitel	091/254-8220
e-mail	<a href="mailto:zdravko.cimbola@gmail.com">zdravko.cimbola@gmail.com</a>
Spol	Muško
Datum rođenja	19.06.1980.
Državljanstvo	Hrvatsko

### Radno iskustvo

Datum (od – do)	05.06.2006.
Naziv poslodavca	COLAS Hrvatska d.d.
Djelatnost	Laboratorij
Radno mjesto	Tehnolog
Glavne aktivnosti	Uvođenje produktnih i ispitnih normi, certifikacija proizvoda (asfalti, agregati, emulzije, površinske obrade), akreditacija ispitnih normi, izrada izvještaja, ispitivanja u građevinarstvu

### Obrazovanje

Datum	06.10.2014.
Ustanova	Građevinski fakultet
Mjesto	Zagreb
Kvalifikacija	dipl. ing. građevinarstva

Datum	07.06.2006.
Ustanova	Geotehnički fakultet
Mjesto	Varaždin
Kvalifikacija	dipl. ing. geotehnike

### Osobne vještine

Materinski jezik	Hrvatski
------------------	----------

Ostalo jezici

Jezik	Engleski
Razumijevanje	Samostalni korisnik
Govor	Samostalni korisnik
Pisanje	Samostalni korisnik
Jezik	Njemački
Razumijevanje	Temeljni korisnik
Govor	Temeljni korisnik
Pisanje	Temeljni korisnik

<b>Komunikacijske vještine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sklonost timskom radu,</li> <li>- dobre komunikacijske vještine stečene s radom u multinacionalnoj kompaniji,</li> <li>- otpornost na rad pod pritiskom</li> </ul>
<b>Organizacijske vještine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobro razvijene organizacijske vještine,</li> <li>- Usavršavanje na leadreship development programu s vještinom vođenja tima,</li> <li>- interni auditor sustava upravljanja ISO 9001, ISO 14001, ISO 18001</li> </ul>
<b>Tehničke vještine i kompetencije</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Izvrsno poznavanje Word, Excel i Power Point programa</li> <li>- Dobro poznavanje VBA,</li> <li>- korištenje Autocad programa,</li> <li>- korištenje Mathcad, Mathematica i Statistica</li> </ul>
<b>Vozačka dozvola</b>	B kategorije