Mjerenje broja čestica u ispušnim plinovima

Radelić, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:904186

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dominik Radelić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Petar Ilinčić, dipl. ing.

Student:

Dominik Radelić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Petru Ilinčiću na ukazanom povjerenju, pomoći i savjetima tijekom izrade rada te prenesenom znanju i entuzijazmu.

Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Zoranu Luliću i laborantima Laboratorija za motore i vozila na pomoći prilikom provođenja mjerenja.

Dominik Radelić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Radelić** Mat. br.: 0035191647

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje broja čestica u ispušnim plinovima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Measurement of particle number in exhaust gases**

Opis zadatka:

Krute čestice, koje nastaju uslijed nepotpunog izgaranja goriva, zakonski su ograničena komponenta u ispušnim plinovima motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI). Osim mase krutih čestica, sve stroži zahtjevi u pogledu emisija motornih vozila i motora s unutarnjim izgaranjem propisuju i mjerenje broja krutih čestica u ispušnim plinovima motora s unutarnjim izgaranjem.

U okviru rada potrebno je:

- Opisati metode koje se primjenjuju za određivanje broja krutih čestica u ispušnim plinovima motora s unutarnjim izgaranjem.
- Napraviti pregled analizatora za brojanje krutih čestica koji se koriste za mjerenja na motorima s unutarnjim izgaranjem.
- Opisati princip rada i osnovne dijelove analizatora za brojanje krutih čestica *TSI 3795*.
- Osmisliti i izraditi radnu uputu za mjerenje broja krutih čestica ispušnih plinova MSUI necestovnih pokretnih strojeva.
- Napraviti seriju probnih mjerenja broja krutih čestica u ispušnom plinu MSUI, analizirati rezultate i izraditi odgovarajući izvještaj. Vrstu i broj motora za ispitivanje dogovoriti s mentorom i voditeljem Laboratorija za motore i vozila.

Sve radnje tijekom izrade rada treba opisati i popratiti odgovarajućim skicama, crtežima odnosno fotografijama. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
2. svibnja 2019.	4. srpnja 2019.	10., 11. i 12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Petar Ilinčić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA IV
POPIS TABLICA VII
POPIS KRATICA IX
POPIS OZNAKA XI
SAŽETAK XIII
SUMMARY XVI
1. UVOD 1
1.1. Krute čestice 1
1.1.1. Grube čestice 3
1.1.2. Akumulacijska skupina 3
1.1.3. Nukleacijska skupina 4
1.2. Utjecaj filtera krutih čestica na veličinu i broj krutih čestica 4
2. MJERENJE EMISIJA KRUTIH ČESTICA 6
2.1. Uzorkovanje i razrjeđivanje 6
2.1.1. Razrjeđivanje ukupnog protoka 6
2.1.2. Razrjeđivanje djelomičnog protoka 7
2.2. Mjerenje mase krutih čestica 8
2.3. Sustav za mjerenje broja čestica 9
2.4. Uloge i zahtjevi za komponente sustava za uzorkovanje 11
2.4.1. Sustav za prijenos čestica 11
2.4.2. Predklasifikator čestica 11
2.4.2.1. Ciklonski separator (ciklon) 12
2.4.2.2. Inercijski separator 12
2.4.2.3. Zahtjevi za predklasifikator čestica 13
2.4.3. Odvajač hlapljivih čestica (VPR) 13
2.4.3.1. Uređaj za razrjeđivanje broja čestica PND_1 14
2.4.3.2. Cijev za isparavanje 14
2.4.3.3. Uređaj za razrjeđivanje broja čestica PND_2 14
2.4.4. Brojač čestica (PNC) 15
2.5. Metode određivanja broja krutih čestica 16
2.5.1. Kondenzacijsko brojanje čestica (CPC) 16
2.5.2. Difuzijska metoda s efektom korone 19
3. PREGLED ANALIZATORA ZA BROJANJE KRUTIH ČESTICA U ISPUŠNIM PLINOVIMA MSUI 21
3.1. Stacionarni analizatori 22
3.1.1. *AVL APC^{plus}* 22
3.1.2. *Grimm 5431* 24
3.1.3. *Horiba MEXA-2200SPCS* 26
3.2. Prijenosni analizatori 28

3.2.1. *Airmodus A23* ... 28
3.2.2. *AVL M.O.V.E PN PEMS iS* ... 30
3.2.3. *Testo NanoMet3* ... 32
3.2.4. *Horiba OBS-ONE-PN* ... 34
3.3. Uređaj za određivanje veličine krutih čestica (*TSI 3090*) ... 36
3.3.1. Princip rada uređaja ... 36
3.3.2. Tehničke karakteristike uređaja ... 37
4. OPIS ANALIZATORA *TSI 3795* ... 39
4.1. Dijelovi i tehničke karakteristike uređaja ... 40
4.2. Princip rada ... 43
4.3. Usporedba tehničkih karakteristika analizatora ... 44
5. UPORABA ANALIZATORA *TSI 3795* ... 46
5.1. Postavljanje uređaja ... 46
5.1.1. Ugradnja sustava za uzorkovanje ... 46
5.1.2. Punjenje spremnika alkoholom ... 47
5.1.3. Povezivanje uređaja s računalom ... 48
5.2. Načini provedbe mjerenja ... 49
5.2.1. Kontrolni način mjerenja prema pravilniku SR 941.242 ... 49
5.2.1.1. Granična vrijednost emisije ... 49
5.2.1.2. Protokol kontrolnog mjerenja ... 50
5.2.2. Opći način mjerenja ... 52
5.3. Upravljanje uređajem ... 53
5.3.1. Glavno sučelje ... 53
5.3.2. Statusna traka ... 54
5.3.3. Dijagnostičko sučelje ... 54
5.3.4. Postavke ... 55
5.3.5. Mjerenje u kontrolnom načinu rada ... 57
5.3.6. Mjerenje u općem načinu rada ... 59
6. INICIJALNA MJERENJA ... 60
6.1. Inicijalna mjerenja s promjenjivom brzinom vrtnje MSUI ... 63
6.2. Inicijalna mjerenja pri konstantnoj brzini vrtnje MSUI ... 65
6.2.1. Radna točka 1 ... 67
6.2.2. Radna točka 2 ... 68
6.2.3. Radna točka 3 ... 69
6.2.4. Radna točka 4 ... 70
6.2.5. Usporedba koncentracija ispred i iza filtra krutih čestica ... 71
7. ISPITIVANJE EMISIJE PN U ISPUŠNIM PLINOVIMA NECESTOVNOG POKRETNOG STROJA ... 72
7.1. Zakonska ograničenja emisija motora NCPS ... 72
7.1.1. NRE kategorija motora ... 74
7.2. Ispitni stroj ... 75
7.3. Ispitna procedura ... 76
7.4. Tijek ispitivanja ... 77
7.5. Rezultati ispitivanja ... 80
7.5.1. Kontrolni način mjerenja ... 80
7.5.2. Opći način mjerenja ... 81
7.5.2.1. Radna točka 1 ... 81

7.5.2.2. Radna točka 2 ... 82
7.5.2.3. Radna točka 3 ... 83
7.5.2.4. Radna točka 4 ... 84
7.5.2.5. Radna točka 5 ... 85
7.5.2.6. Radna točka 6 ... 86
7.5.2.7. Radna točka 7 ... 87
7.5.2.8. Radna točka 8 ... 88
7.5.2.9. Radna točka 9 ... 89
7.5.2.10. Radna točka 10 ... 90
7.6. Analiza rezultata ... 91
7.7. Konverzija rezultata i korelacija PN i PM ... 93
8. ZAKLJUČAK ... 96
LITERATURA ... 97
PRILOZI ... 100

POPIS SLIKA

Slika 1. Produkti nepotpunog izgaranja MSUI [1] 1
Slika 2. Sastav krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI 2
Slika 3. Primjer raspodjele broja i mase krutih čestica u ispušnim plinovima Dieselovog MSUI u ovisnosti o aerodinamičkom promjeru [4] 3
Slika 4. Tipična raspodjela PN ovisno o veličini krutih čestica na dijelu ispušnog sustava prije i poslije prolaska kroz DPF [5] 5
Slika 5. Shematski prikaz sustava za razrjeđivanje ukupnog protoka s primarnim i sekundarnim tunelom za razrjeđivanje prije mjerenja mase PM [7] 7
Slika 6. Shematski prikaz PFD sustava za uzorkovanje i razrjeđivanje protoka ispušnih plinova prije mjerenja mase PM [7] 8
Slika 7. Shematski prikaz sustava za mjerenje broja krutih čestica nakon razrjeđivanja ukupnog protoka ispušnih plinova [9] 9
Slika 8. Shematski prikaz sustava za mjerenje broja krutih čestica nakon razrjeđivanja djelomičnog protoka ispušnih plinova [9] 10
Slika 9. Shematski prikaz rada ciklonskog separatora [10] 12
Slika 10. Shematski prikaz rada inercijskog separatora (*w* – promjer mlaznice, *s* – udaljenost mlaznice i ploče separatora) [11] 13
Slika 11. Usporedba homogene i heterogene nukleacije u vremenu [12] 16
Slika 12. Shematski prikaz CPC brojača krutih čestica [16] 17
Slika 13. Shematski prikaz načina rada ukupnog intenziteta svjetlosti [18] 18
Slika 14. Shematski prikaz određivanja broja krutih čestica pomoću difuzijske metode [13] 19
Slika 15. Shematski prikaz uređaja DiSC koji primjenjuje difuzijsku metodu za određivanje broja krutih čestica [19] 20
Slika 16. Stacionarni analizator *AVL APC^{plus}* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [20] 22
Slika 17. Stacionarni analizator *Grimm 5431* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [21] 24
Slika 18. Stacionarni analizator *Horiba* serije *MEXA-2000SPCS* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [22] 26
Slika 19. Prijenosni analizator *Airmodus A23* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [23] 28
Slika 20. Prijenosni analizator *AVL M.O.V.E PN PEMS iS* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje difuzijsku metodu [24] 30
Slika 21. *AVL PN PEMS* sustav za praćenje emisija u realnim uvjetima vožnje ugrađen na stražnji dio vozila [24] 30
Slika 22. Prijenosni analizator *Testo NanoMet3* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje difuzijsku metodu [25] 32
Slika 23. Prijenosni analizator *Testo NanoMet3* za mjerenje broja krutih čestica postavljen u prtljažniku vozila [25] 32
Slika 24. Prijenosni analizator *Horiba OBS-ONE*-PN koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [26] 34
Slika 25. Postavljanje *Horiba PEMS* sustava na stražnji kraj vozila [26] 34
Slika 26. Uređaj za određivanje broja i raspodjele krutih čestica *TSI Model 3090* [27] 36
Slika 27. Shematski prikaz principa rada uređaja *TSI Model 3090* [27] 37

Slika 28. Analizator *TSI 3795* za određivanje broja krutih čestica [28] 39
Slika 29. Analizator *TSI 3795* u uporabi 39
Slika 30. Dijelovi sustava za uzorkovanje analizatora *TSI 3795* 40
Slika 31. Položaj priključaka za sustav uzorkovanja zajedno s kućištem ciklonskog separatora i odvajačem vode na stražnjoj strani uređaja 41
Slika 32. Stražnja strana uređaja *TSI 3795* 41
Slika 33. Shematski prikaz rada analizatora *TSI 3795* [29] 43
Slika 34. Stražnja strana analizatora s priključenim crijevima za prijenos uzorka ispušnih plinova i zraka za razrjeđivanje 47
Slika 35. Staklena kapsula za punjenje spremnika radne tekućine 47
Slika 36. Spremnik radne tekućine uronjen u radnu tekućinu unutar staklene kapsule za punjenje 48
Slika 37. Izgled izvješća o provedenom ispitivanju u kontrolnom načinu mjerenja [25] 52
Slika 38. Izgled glavnog upravljačkog sučelja 53
Slika 39. Izgled statusne trake u slučaju pojave pogreške [31] 54
Slika 40. Izgled dijagnostičkog sučelja uređaja [31] 55
Slika 41. Izgled sučelja postavki uređaja 56
Slika 42. Izgled sučelja za unos podataka o operateru 56
Slika 43. Izgled sučelja za pripremu mjerenja u kontrolnom načinu 57
Slika 44. Izgled sučelja s uputama za kondicioniranje motora i uređaja [31] 57
Slika 45. Izgled sučelja kontrolnog mjerenja [31] 58
Slika 46. Izgled sučelja konačnih rezultata u kontrolnom načinu mjerenja [31] 58
Slika 47. Izgled sučelja općeg načina mjerenja prije početka [31] 59
Slika 48. Izgled sučelja općeg načina mjerenja po završetku [31] 59
Slika 49. Postavljanje mjerne opreme za inicijalna mjerenja na vozilu s GDI motorom 60
Slika 50. Izmjerene vrijednosti PN tijekom 1. ispitivanja pri kojem je zabilježena pogreška 61
Slika 51. Izmjerene vrijednosti PN tijekom 2. ispitivanja pri kojem je zabilježena pogreška 61
Slika 52. Prihvat sonde za uzorkovanje unutar ispušne cijevi ispitnog vozila 62
Slika 53. Izmjerene vrijednosti PN tijekom ispitivanja s porastom brzine vrtnje motora 63
Slika 54. Izmjerene vrijednosti PN tijekom ispitivanja s višestrukim promjenama brzine vrtnje motora 64
Slika 55. Ispitni motor *PSA DV6* priključen na hidrauličku kočnicu 65
Slika 56. Postavljanje mjerne opreme za mjerenje emisija PN motora *PSA DV6* u ispitnoj kabini 66
Slika 57. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 1 67
Slika 58. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 2 68
Slika 59. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 3 69
Slika 60. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 4 70
Slika 61. Kronologija donošenja Uredbe (EU) 2016/1628 i njenih izmjena i dopuna 73
Slika 62. Bager *Liebherr A914* [35] 75
Slika 63. Pogonski sustav bagera *Liebherr A914* 75
Slika 64. Postavljanje mjerne opreme 77
Slika 65. Izvješće nevažećeg mjerenja poništenog zbog pojave pogreške 78

Slika 66. Izvješće provedenog mjerenja u kontrolnom načinu rada analizatora pri razini brzine vrtnje motora 4/10 78
Slika 67. Provođenje mjerenja u kontrolnom načinu rada uređaja 79
Slika 68. Dijagram promjene prosječne vrijednosti emisije PN u ovisnosti o brzini vrtnje motora u kontrolnom načinu mjerenja 80
Slika 69. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 1 81
Slika 70. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 2 82
Slika 71. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 3 83
Slika 72. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 4 84
Slika 73. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 5 85
Slika 74. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 6 86
Slika 75. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 7 87
Slika 76. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 8 88
Slika 77. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 9 89
Slika 78. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 10 90
Slika 79. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u svim radnim točkama tijekom mjerenja u općem načinu rada uređaja 91
Slika 80. Dijagram promjene prosječne vrijednosti emisije PN u ovisnosti o brzini vrtnje motora u kontrolnom i općem načinu mjerenja 92
Slika 81. Korelacija između vrijednosti PN i PM lakih i teških gospodarskih vozila (LD – *Light-Duty*, HD – *Heavy-Duty*) [37] 94

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *AVL APC^{plus}* za mjerenje emisije krutih čestica promjera manjeg od 23 nm (engl. *Advanced for sub 23 nm*) 23
Tablica 2. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *Grimm 5431* 25
Tablica 3. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *Horiba MEXA-2200SPCS* 27
Tablica 4. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Airmodus A23* 29
Tablica 5. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *AVL M.O.V.E PN PEMS iS* 31
Tablica 6. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Testo NanoMet3* 33
Tablica 7. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Horiba OBS-ONE-PN* 35
Tablica 8. Tehničke karakteristike uređaja *TSI Model 3090* 38
Tablica 9. Tehničke karakteristike analizatora *TSI 3795* 42
Tablica 10. Usporedni prikaz tehničkih podataka analizatora za određivanje broja krutih čestica u ispušnim plinovima 45
Tablica 11. Vrijednosti potrebne za teorijsku konverziju granične vrijednosti emisije PN prema [32] 50
Tablica 12. Tehničke karakteristike motora *PSA DV6* 65
Tablica 13. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 1 67
Tablica 14. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 2 68
Tablica 15. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 3 69
Tablica 16. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 4 70
Tablica 17. Prosječne vrijednosti PN tijekom mjerenja u radnim točkama 1-4 71
Tablica 18. Granične vrijednosti emisija V. stupnja kategorije motora NRE [34] 74
Tablica 19. Tehničke karakteristike motora 76
Tablica 20. Granične vrijednosti emisija ispušnih plinova IV. stupnja emisija prema [36] 76
Tablica 21. Izračunate srednje vrijednosti emisija PN u pojedinim radnim točkama 80
Tablica 22. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 1/10 81
Tablica 23. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 2/10 82
Tablica 24. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 3/10 83
Tablica 25. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 4/10 84
Tablica 26. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 5/10 85
Tablica 27. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 6/10 86
Tablica 28. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 7/10 87
Tablica 29. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 8/10 88
Tablica 30. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 9/10 89
Tablica 31. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 9/10 90

Tablica 32. Usporedba prosječnih vrijednosti emisija PN izmjerenih u kontrolnom i općem načinu rada uređaja 93
Tablica 33. Konvertirane prosječne vrijednosti emisija PN izmjerenih u kontrolnom i općem načinu rada uređaja 94
Tablica 34. Prosječne vrijednosti emisija PM u kontrolnom i općem načinu rada uređaja izračunate iz korelacije emisija PN i PM 95

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
CI	kompresijsko paljenje (engl. *Compression Ignition*)
CO	ugljikov monoksid
CO_2	ugljikov dioksid
CPC	kondenzacijsko brojanje čestica (engl. *Condensation Particle Counting*)
CVS	uzorkovanje konstantnog volumena (engl. *Constant Volume Sampling*)
DC	difuzijska metoda s efektom korone (engl. *Diffusion Charging*)
DOC	oksidacijski katalizator (engl. *Diesel Oxydation Catalyst*)
DPF	filtar krutih čestica (engl. *Diesel Particulate Filter*)
ET	cijev za isparavanje (engl. *Evaporation Tube*)
EU	Europska unija (engl. *European Union*)
GDI	izravno ubrizgavanje benzinskog goriva u cilindar engl. *Gasoline Direct Injection*
H_2O	voda
H_2SO_4	sumporna kiselina
HC	ugljikovodici
HD	teško gospodarsko vozilo (engl. *Heavy-Duty*)
HEPA	filtar zraka visoke učinkovitosti (engl. *High-Efficiency Particulate Absorbing*)
LD	lako gospodarsko vozilo (engl. *Light-Duty*)
MSUI	motor s unutarnjim izgaranjem
N_2	dušik
NCPS	necestovni pokretni stroj
NO_x	dušikovi oksidi
PEMS	prijenosni sustav za mjerenje emisija (engl. *Portable Emissions Measurement System*)
PFD	razrjeđivanje djelomičnog protoka (engl. *Partial Flow Dilution*)
PFDS	sustav za razrjeđivanje djelomičnog protoka (engl. *Partial Flow Dilution System*)
PM	krute čestice (engl. *Particulate Matter*)
PMP	Program mjerenja čestica (engl. *Particle Measurement Programme*)
PN	broj krutih čestica (engl. *Particle Number*)
PNC	brojač krutih čestica (engl. *Particle Number Counter*)
PND	uređaj za razrjeđivanje (engl. *Particle Number Diluter*)
SCR	katalizator selektivne redukcije (engl. *Selective Catalytic Reduction*)
SO_x	sumporni oksidi
UNECE	Ekonomska komisija Ujedinjenih naroda za Europu (engl. *United Nations Economic Commission for Europe*)

VPR	odvajač hlapljivih čestica (engl. *Volatile Particle Remover*)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	faktor za izračun zamjenske vrijednosti emisija HC
b_e	g/kWh	specifična efektivna potrošnja goriva
CO	g/kWh	granična vrijednost emisije ugljikovog monoksida
D_p	μm	aerodinamički promjer krute čestice
d_p	nm	promjer električne mobilnost krute čestice
d_u	mm	unutarnji promjer izlazne cijevi sustava za prijenos čestica
f	Hz	frekvencija
f_k	1/mg	faktor korelacije PM i PN
f_r	%	faktor smanjenja koncentracije čestica
HC	g/kWh	granična vrijednost emisije ugljikovodika
I	A	jakost električne struje
k	-	umjerni faktor
L_t	kg_Z/kg_G	stehiometrijska masa zraka za izgaranje 1 kg goriva
NOx	g/kWh	granična vrijednost emisije dušikovih oksida
P	W	snaga
PM	g/kWh	emisija mase krutih čestica
PM	g/kWh	granična vrijednost emisije mase krutih čestica
PN	1/kWh	granična vrijednost emisije broja krutih čestica
PN	1/kWh	konvertirana vrijednost emisije broja krutih čestica
$PNFE$	%	efikasnost filtracije filtra krutih čestica
PN_{ispred}	cm^{-3}	prosječna izmjerena vrijednost emisije broja krutih čestica ispred filtra krutih čestica
PN_{iza}	cm^{-3}	prosječna izmjerena vrijednost emisije broja krutih čestica iza filtra krutih čestica
PN_{LRV}	m^{-3}	vrijednost koncentracije PN u ispušnim plinovima prema pravilniku SR 941.242
PN_{max}	cm^{-3}	najviša izmjerena vrijednost emisije broja krutih čestica
PN_{min}	cm^{-3}	najniža izmjerena vrijednost emisije broja krutih čestica
PN_{VAMV}	1/kWh	vrijednost koncentracije PN u ispušnim plinovima u ovisnosti o efektivnom radu MSUI
R^2	-	koeficijent determinacije
Re	-	*Reynoldsov* broj
T	°C	temperatura
t_{10-90}	s	vrijeme odziva od 10 do 90 % vrijednosti
t_{90}	s	vrijeme odziva do 90 % vrijednosti
T_{ET}	°C	temperatura stijenke cijevi za isparavanje

t_{i1}	s	vrijeme trajanja prvog mirovanja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
t_{i2}	s	vrijeme trajanja drugog mirovanja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
t_{m1}	s	vrijeme trajanja prvog mjerenja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
t_{m2}	s	vrijeme trajanja drugog mjerenja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
t_{m3}	s	vrijeme trajanja trećeg mjerenja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
T_{PND1}	°C	temperatura stijenke prvog uređaja za razrjeđivanje
$T_{raz.\ pl.}$	°C	temperatura ispušnog plina na ulazu u brojač krutih čestica
t_z	s	vrijeme zadržavanja u sustavu za prijenos čestica
t_{zagr}	s	vrijeme zagrijavanja tijekom kontrolnog mjerenja analizatora
U	V	napon električne struje

Grčke oznake	**Jedinica**	**Opis**
λ	-	faktor pretička zraka
ρ	g/cm^3	jedinična gustoća
ρ_{isp_pl}	kg/m^3	pretpostavljena gustoća ispušnih plinova MSUI u standardnim uvjetima

SAŽETAK

Obzirom na štetan utjecaj na zdravlje ljudi i onečišćenje okoliša, različitim homologacijskim propisima ograničene su emisije štetnih tvari koje vozila i drugi strojevi pogonjeni MSUI ispuštaju u okoliš. U ispušnim plinovima prisutne su krute čestice različitih oblika i dimenzija. Općenito se krute čestice u ispušnim plinovima s obzirom na kemijski sastav, način postanka i aerodinamički promjer čestica mogu podijeliti u tri skupine: grube čestice, akumulacijska skupina, nukleacijska skupina. Za redukciju emisije mase PM u vozilima i strojevima pogonjenim suvremenim Dieselovim MSUI zadužen je kombinirani sustav oksidacijskog katalizatora (DOC) te filtra krutih čestica (DPF).

Za pripremu uzorka ispušnog plina koji će se ispitivati mjernim instrumentima koristi se sustav uzorkovanja i razrjeđivanja čija je zadaća prikupiti ispušne plinove MSUI, smanjiti koncentraciju komponenti ispušnih plinova na odgovarajuću razinu prikladnu za mjerenje, sniziti temperaturu na prikladnu vrijednost te regulirati procese kondenzacije i nukleacije. Uobičajene su u primjeni metode razrjeđivanja ukupnog protoka uz uzorkovanje konstantnog volumena (CVS) i razrjeđivanja djelomičnog protoka (PFD). U sustavu za razrjeđivanje ukupnog protoka prikupljaju se svi ispušni plinovi iz MSUI te se razrjeđuju u tunelu za razrjeđivanje, dok se kod razrjeđivanja djelomičnog protoka uzorkuje i razrjeđuje manji dio.

Mjerenje mase PM osnovna je metoda mjerenja emisija krutih čestica MSUI, ali se pokazala nedostatnom zbog nemogućnost detekcije niskih masenih emisija PM suvremenih MSUI konvencionalnim vaganjem. Također, mjerenjem mase PM nije moguće provjeriti učinkovitosti rada filtra krutih čestica. Mjerenje PN preciznija je i brža metoda mjerenja od mjerenja mase PM uz bolju razlučivost. Mjerenje kojim se utvrđuju emisije PN u ispušnim plinovima provodi se kontinuiranim uzorkovanjem iz sustava za razrjeđivanje djelomičnog protoka ili iz sustava za razrjeđivanje ukupnog protoka. Za učinkovito mjerenje sve komponente sustava za uzorkovanje i razrjeđivanje moraju obavljati svoje predviđene uloge na odgovarajući način i s odgovarajućom točnošću.

Određivanje broja krutih čestica u ispitnom uzorku ispušnih plinova MSUI obavlja se pomoću brojača krutih čestica. U praktičnoj primjeni ustalile su se dvije metode određivanja PN u ispušnim plinovima MSUI: kondenzacijsko brojanje čestica (CPC) i difuzijska metoda s efektom korone (DC).

Za analizu ispušnih plinova MSUI upotrebljava se niz instrumenata, različitih tehničkih karakteristika, konfiguracija i metoda mjerenja. Analizatori se je prema mjestu, odnosno načinu provođenja ispitivanja dijele na stacionarne i prijenosne. U primjeni su prisutni mjerni instrumenti različitih proizvođača.

TSI 3795 prijenosni je analizator namijenjen mjerenju broja krutih čestica u ispušnim plinovima. Uređaj se može koristiti za ispitivanja u laboratoriju ili u stvarnim uvjetima rada, a u radu primjenjuje CPC metodu za određivanje broja krutih čestica. Unutar uređaja obavlja se razrjeđivanje uzorka i pretkondicioniranje kao priprema za mjerenje broja krutih čestica. Uređaj primjenjuje dva osnovna načina mjerenja: kontrolni način mjerenja prema pravilniku SR 941.242 i opći način mjerenja. Kontrolno mjerenje podijeljeno je u nekoliko faza nakon kojih se na osnovu rezultata mjerenja određuje zadovoljava li stroj zakonski uvjet o broju krutih čestica u ispušnim plinovima. Opći način mjerenja služi za kontinuirano mjerenje PN u zadanom vremenskom intervalu. Upravljanje funkcijama uređaja u radu obavlja se na računalu pomoću specijaliziranog programskog alata naredbama preko grafičkog (korisničkog) sučelja.

Nakon postavljanja i osposobljavanja uređaja za rad proveden je niz inicijalnih mjerenja kako bi se utvrdile mogućnosti uređaja u radu i probno ispitao sam uređaj. Ispitivanja su provedena u stacionarnim uvjetima, a mjerene su koncentracije PN u ispušnim plinovima vozila s GDI motorom te eksperimentalnog MSUI s kompresijskim paljenjem priključenog na hidrauličku kočnicu u laboratoriju. Pri provođenju mjerenja korišten je opći režim rada analizatora *TSI 3795*, a mjerenja su provedena u različitim radnim točkama motora s promjenjivom brzinom vrtnje motora i pri konstantnoj brzini vrtnje motora prije i nakon obrade DPF-om. Utvrđeno je da su prosječne vrijednosti PN iza filtra u svim radnim točkama mjerenja manje od prosječnih vrijednosti PN ispred filtra krutih čestica. Na temelju razlike prosječnih vrijednosti izmjerenih ispred i iza filtra krutih čestica utvrđena njegova efikasnost filtracije.

Analizatorom *TSI 3795* provedeno je ispitivanje emisije PN građevinskog stroja, bagera *Liebherr A914.* Mjerenja su provedena u 10 različitih radnih točaka s konstantnom brzinom vrtnje u kontrolnom i općem načinu rada analizatora s ciljem usporedbe vrijednosti rezultata mjerenja različitim načinima. Ispitivanje je podijeljeno na dva dijela (10 mjerenja u kontrolnom i 10 mjerenja u općem načinu rada analizatora). Budući da ispitni stroj nije opremljen DPF-om, izmjerene vrijednosti u oba režima rada uređaja veće su od granične vrijednosti od 250 000 cm^{-3} propisane pravilnikom SR 941.242. Uzevši u obzir cijeli profil

izmjerene emisije može se zaključiti da su pri konstantnoj brzini vrtnje izmjerene vrijednosti emisija relativno jednolikog karaktera s blagim poremećajima što potvrđuju standardne devijacije i koeficijenti varijacije. Iz rezultata ispitivanja zaključeno je da nema jasne veze između povećanja ili smanjenja brzine vrtnje i povećanja ili smanjenja prosječne emisije PN kroz cijeli tijek mjerenja u provedenim ispitivanjima. Prosječne vrijednosti emisije PN oba načina rada uređaja bliske su u svim radnim točkama u kojima su se provodila mjerenja. Iz prosječnih vrijednosti emisije PN po jedinici volumena (cm^{-3}) konverzijom su izračunate prosječne vrijednosti emisije PN izražene po jedinici rada stroja (1/kWh). Na temelju korelacije PN i PM izračunate su prosječne vrijednosti emisije PM obavljenih mjerenja. Prosječne vrijednosti emisija PM u oba načinu rada uređaja izračunate iz korelacije emisija PN i PM niže su pri svim brzinama vrtnje motora od granične vrijednosti IV. i V. stupnja emisija.

Ključne riječi: mjerenje broja krutih čestica, krute čestice, analizator za brojanje krutih čestica, emisije motora s unutarnjim izgaranjem

SUMMARY

Due to adverse impacts on human health and environmental pollution, various emission regulations have limited emissions of pollutants released by the vehicles and other ICE driven machinery into the environment. Particulate matter of various shapes and dimensions is present in the exhaust gas. Generally it can be divided into three groups with regard to the chemical composition, the method of generation and the aerodynamic diameter of the particles: coarse particles, accumulation mode and nucleation mode. A combined system of DOC and DPF is responsible for PM mass emission reduction in modern Diesel engines.

Sampling and dilution system is used for measurement preparation. Its role is to collect the exhaust gases, reduce the exhaust gas components concentration to a level suitable for measurement and regulate the condensation and nucleation processes. Total flow dilution with constant volume sampling (CVS) and partial flow dilution (PFD) are two commonly used methods used for exhaust gas dilution. In total flow dilution system, the entire exhaust gas flow is collected and diluted inside a dilution tunnel whereas the partial flow dilution system samples and dilutes only a smaller fraction of the flow.

PM mass measurement is the basic method used for measuring PM emissions. However, it has been found insufficient due to inability to detect low PM emissions of modern ICE by the means of conventional gravimetric weighting methods. Furthermore, by measuring PM mass emissions it is not possible to test DPF effectiveness. Particle number (PN) concentration measurement provides better precision and measuring speed, as well as resolution than PM mass measuring method. PN concentration measurement is carried out by continuous sampling from partial flow dilution system or full flow dilution system. For effective measurement it is necessary for all dilution system components to operate efficently and with precision.

Determination of PN concentration in the exhaust gas sample is performed by a particle number counter (PNC). Currently there are two methods of determining PN in practical use: Condensation Particle Counting (CPC) and Diffusion Charging (DC) method.

A whole range of instruments with various technical characteristics, configurations and measurement methods is currently in use for exhaust gas PN concentration analysis.

Analyzers are divided into stationary and portable according to their use. Instruments in use are provided by various manufacturers of measuring equipment.

TSI 3795 is a portable analyzer designed for measuring PN concentration in ICE exhaust gas. It can be used for laboratory tests or measurement in real operating conditions. The device applies the CPC method for PN concentration determination. Sample dilution and pre-conditioning are performed within the device as a preparation for PN concentration measuring. Two modes of operation are used in measurement processes: Official Mode compliant with SR 941.242 and General Measurement Mode. Measurement in the Official Mode is divided into several phases after which it is determined if the machine meets the legal requirement for exhaust gas PN concentration. The General Measurement Mode is used for continuous measurement of PN concentration in a given time interval. The device is operated via graphical interface on a computer using specialized software.

After setting up the instrument and the measuring equipment, a series of initial measurements were carried out to determine the instrument capabilities. The tests were carried out under stationary conditions measuring the PN concentration in the exhaust gases of the GDI engine and the experimental ICE with compressed ignition connected to a laboratory hydraulic dynamometer. The General Measurement Mode was used during the measurements which were carried out at variable engine speed as well as constant engine speed. During the measurements carried out at constant engine speed PN concentrations were measured in exhaust before and after DPF treatment. Based on the difference between the average PN concentration values measured before and after treatment, Particle Number Filtering Efficiency (PNFE) was determined.

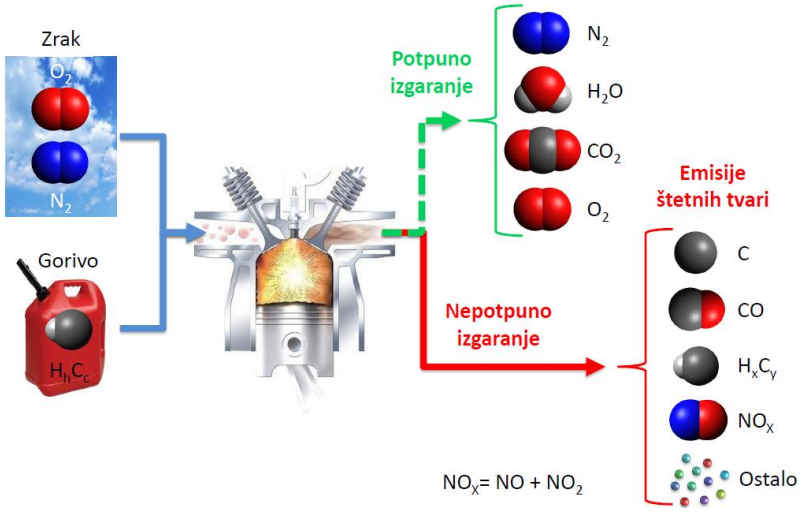
TSI 3795 analyzer was used for the PN concentration measuring of Liebherr A914 excavator. Measurements were performed in 10 different engine working points with constant engine speed using Official and General Measurement modes with a goal to compare the measurement results of different measurement modes. The test was divided into two parts (10 measurements using Official and 10 measurements using General mode). Since the test machine is not equipped with a DPF, the values measured in both operating modes were greater than the 250 000 cm^{-3} limit value set by the SR 941.242. Taking into account the entirety of measured emission, it can be concluded that at constant engine speed, the emission values present a relatively uniform character with mild disturbances which is confirmed by the standard deviation and variance coefficient values. Another conclusion derived from the testing results was that there is no clear connection between the increase or decrease in engine

speed and the increase or decrease in average PN emission throughout the entire course of measurement. The average PN concentration values measured during both measurement modes are close in value at all measurement points. The average values of PN concentration per kWh were calculated by converting the average measured values of PN concentration (cm^{-3}). Based on the correlation between PN and PM concentration, the average values of PM emission for the conducted measurements were calculated. The average values of PM emission of the tested machine were lower than the Stage IV and Stage V limit values at all measured engine speeds.

Key words: particle number concentration measurement, particulate matter, particle number analyzer, internal combustion engines emissions

1. UVOD

Ispušni plinovi motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) nastaju kao posljedica procesa izgaranja smjese goriva i zraka unutar cilindra motora. U idealnom procesu dolazi do potpunog izgaranja smjese goriva i zraka pri čemu kao produkti nastaju: CO_2, H_2O i N_2. U realnim uvjetima odvijanja procesa to nije slučaj. Tada zbog nepotpunog izgaranja u cilindru nastaje i niz štetnih spojeva koji se kroz ispušni sustav prenose u okoliš (slika 1.). Obzirom na štetan utjecaj na zdravlje ljudi i onečišćenje okoliša, različitim homologacijskim propisima ograničene su emisije štetnih tvari koje vozila i drugi strojevi pogonjeni MSUI ispuštaju u okoliš. Propisane granične emisije štetnih tvari u ispušnim plinovima odnose se na plinovite spojeve (CO, HC, NO_x) te na krute čestice.

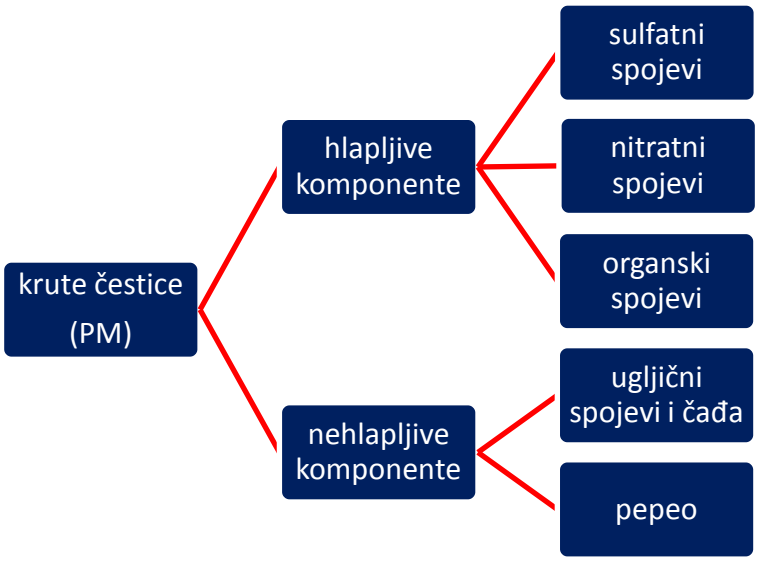


Slika 1. Produkti nepotpunog izgaranja MSUI [1]

1.1. Krute čestice

Krute čestice u ispušnim plinovima MSUI čini smjesa elementarnog ugljika, različitih ugljikovodika te sumpornih i drugih spojeva i komponenti (slika 2.). Pritom je značajan i udio hlapljivih spojeva čija svojstva ovise o temperaturi i drugim uvjetima. Takav sustav aerosola kompleksnih je fizikalnih i kemijskih svojstava.

U ispušnim plinovima prisutne su krute čestice različitih oblika i dimenzija, a pripadaju primarnoj skupini čestica koje su u zrak emitirane izravno iz izvora izgaranja. U zraku se osim primarnih pronalaze i sekundarne čestice koje se formiraju u atmosferi uslijed kemijskih reakcija, najčešće oksidacijskim procesima.



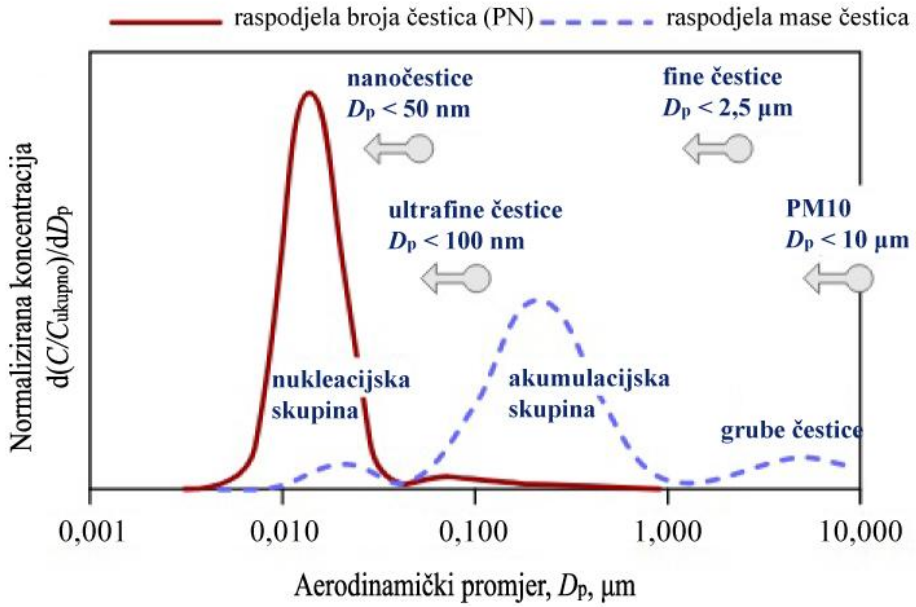
Slika 2. Sastav krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI

Općenito se krute čestice u ispušnim plinovima mogu podijeliti u tri skupine s obzirom na kemijski sastav, način postanka i aerodinamički promjer čestica[1][2]:

1. Grube čestice (engl. *Coarse Mode*) – aerodinamičkog promjera $D_p > 1$ μm;
2. Akumulacijska skupina (engl. *Accumulation Mode*) – aerodinamičkog promjera $D_p = 50$ nm ÷ 1 μm;
3. Nukleacijska skupina (engl. *Nucleation Mode*) – aerodinamičkog promjera $D_p \leq$ 50 nm.

Primjer raspodjele broja krutih čestica i mase u ovisnosti o aerodinamičkom promjeru čestica prikazan je na slici 3.

[1] Aerodinamički promjer čestice – promjer sfere jedinične gustoće ($\rho = 1$ g/cm^3), čija je ravnotežna brzina u mirnome zraku pri djelovanju sile teže i otpora zraka jednaka brzini čestice uz iste atmosferske uvjete [3][3].



Slika 3. Primjer raspodjele broja i mase krutih čestica u ispušnim plinovima Dieselovog MSUI u ovisnosti o aerodinamičkom promjeru [4]

1.1.1. Grube čestice

Krute čestice koje pripadaju u ovu skupinu uglavnom nastaju mehaničkim putem. Kod MSUI to su čestice koje ne nastaju kao produkt izgaranja već se talože na stijenkama cilindra i ispušnog sustava te zatim s ispušnim plinovima izlaze u atmosferu. Grube čestice vidljive su golim okom i doprinose ukupnoj masi krutih čestica (PM) u masenom udjelu od 5 do 20 % [4]. S druge pak strane njihov je udio u broju krutih čestica u ispušnim plinovima (PN) zanemarivo malen.

1.1.2. Akumulacijska skupina

Akumulacijska skupina čestica obuhvaća široki raspon krutih čestica, a najveća je koncentracija krutih čestica aerodinamičkog promjera između 100 i 200 nm [4]. Čestice ove skupine čine krute čestice elementarnog ugljika pomiješane s kondenziranim i adsorbiranim spojevima. Primarno nastaju kao posljedica kondenzacije hlapljivih spojeva na sitnijim česticama [2]. Dominantan maseni udio u PM predstavlja upravo akumulacijska skupina čestica, a udio u PN, kao i kod grubih čestica, je malen.

1.1.3. Nukleacijska skupina

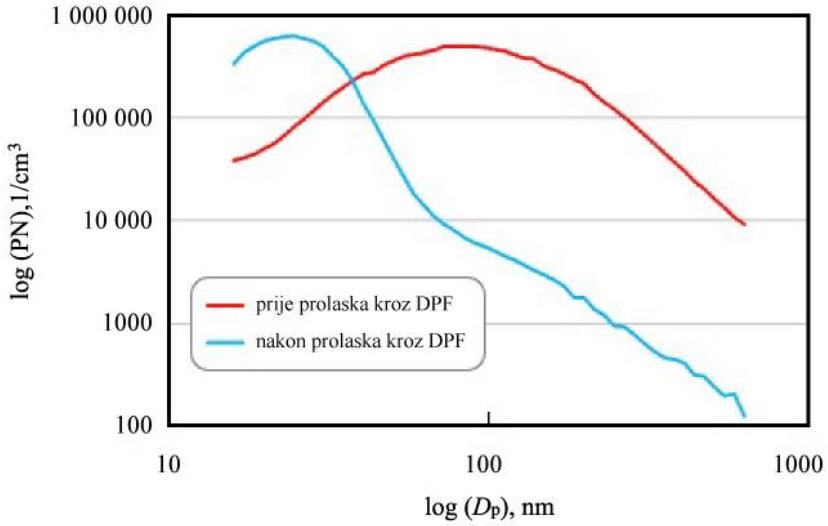
Nukleacijsku skupinu čine najsitnije nano-čestice koje nastaju nukleacijom u cilindru MSUI i ispušnom sustavu, a sastoje se uglavnom od hlapljivih kondenzata i sadrže mali udio krutog materijala. Najveća je koncentracija čestica aerodinamičkog promjera između 10 i 20 nm. Ova skupina čestica zbog male mase predstavlja 0,1 do 10 % masenog udjela u PM, ali je dominantan faktor u PN koncentraciji. Uobičajeni je udio preko 90 % PN, a u pojedinim slučajevima i do 99 % PN koncentracije [4].

1.2. Utjecaj filtera krutih čestica na veličinu i broj krutih čestica

U svrhu poštivanja sve rigoroznijih propisa po pitanju graničnih vrijednosti emisija ispušnih plinova koji se postavljaju pred suvremene MSUI, proizvođači u vozila i strojeve ugrađuju sustave za naknadnu obradu ispušnih plinova. Za redukciju emisije mase PM u vozilima i strojevima pogonjenim suvremenim Dieselovim MSUI zadužen je kombinirani sustav oksidacijskog katalizatora (DOC) te filtra krutih čestica (DPF). Iako je osnovna uloga DOC katalizatora oksidacija CO i neizgorenih organskih spojeva, njime se postiže i oksidacija NO u NO_2 što dovodi do povećanje temperature i oksidacije PM u DPF-u.

DPF izdvaja krute čestice iz ispušnih plinova postupkom filtracije pri čemu se čestice zadržavaju na stijenkama filtra, a preostali dio ispušnih plinova prolazi kroz filtar. Učinkovitost postupka generalno je vrlo visoka, a primjenom pojedinih vrsta filtara postiže se učinkovitost i iznad 99 % [5]. Nakon određenog perioda započinje regeneracija filtra koja se postiže povišenjem temperature ispušnih plinova do vrijednosti pri kojima prikupljene PM oksidiraju.

Unatoč tome što DPF prikuplja i oksidira gotovo sve krute čestice unutar ispušnih plinova, smanjujući time masu PM koja se emitira u okoliš, hlapljive čestice koje se pri nailasku na filtar nalaze u plinovitom agregatnom stanju često slobodno prolaze kroz sustav. S padom temperature ispušnih plinova na predjelu ispušnog sustava nakon DPF-a hlapljive čestice teže ponovnom prelasku u kapljevito agregatno stanje. Budući da zbog prethodnog uklanjanja krutih čestica u tom trenutku nije na raspolaganju dovoljna površina za kondenzaciju hlapljivih čestica, dolazi do procesa homogene nukleacije i stvaranja novih krutih čestica koje pripadaju nukleacijskoj skupini. Vidljivo je iz dijagrama na slici 2. da čestice nukleacijske skupine čine u tom dijelu ispušnog sustava dominantan udio u PN.



Slika 4. Tipična raspodjela PN ovisno o veličini krutih čestica na dijelu ispušnog sustava prije i poslije prolaska kroz DPF [5]

2. MJERENJE EMISIJA KRUTIH ČESTICA

2.1. Uzorkovanje i razrjeđivanje

Prije samog početka mjerenja pojedinih komponenti ispušnih plinova MSUI potrebno je pripremiti uzorak ispušnog plina koji će se ispitivati mjernim instrumentima. Za tu svrhu koristi se sustav uzorkovanja i razrjeđivanja čija je zadaća prikupiti ispušne plinove MSUI, smanjiti koncentraciju komponenti ispušnih plinova na odgovarajuću razinu prikladnu za mjerenje, sniziti temperaturu na prikladnu vrijednost te regulirati procese kondenzacije i nukleacije. Ispravnim postupkom razrjeđivanja onemogućava se kondenzacija hlapljivih komponenti na stijenkama sustava za uzorkovanje čime se poboljšava preciznost mjerenja.

Uobičajene su u primjeni metode razrjeđivanja:

1. Razrjeđivanje ukupnog protoka uz uzorkovanje konstantnog volumena (CVS);
2. Razrjeđivanje djelomičnog protoka (PFD).

Kao sredstvo za razrjeđivanje ispušnih plinova može se primjenjivati zrak iz okoline, sintetski zrak ili dušik. Pritom je važna odgovarajuća temperatura sredstva za razrjeđivanje, a sustav za razrjeđivanje mora biti u mogućnosti osigurati dovoljno velik protok da se posve spriječi kondenzacija vode. Regulacija temperature i vlažnosti sredstva za razrjeđivanje postiže se i pretkondicioniranjem prije miješanja s ispušnim plinovima.

Osim navedenih metoda razrjeđivanja pojedina ispitivanja provode se uzorkovanjem bez razrjeđivanja ispušnih plinova (engl. *Raw exhaust sampling*). Mjerenje broja krutih čestica tada se provodi izravno iz protoka ispušnih plinova MSUI pri temperaturama iznad temperature kondenzacije.

2.1.1. Razrjeđivanje ukupnog protoka

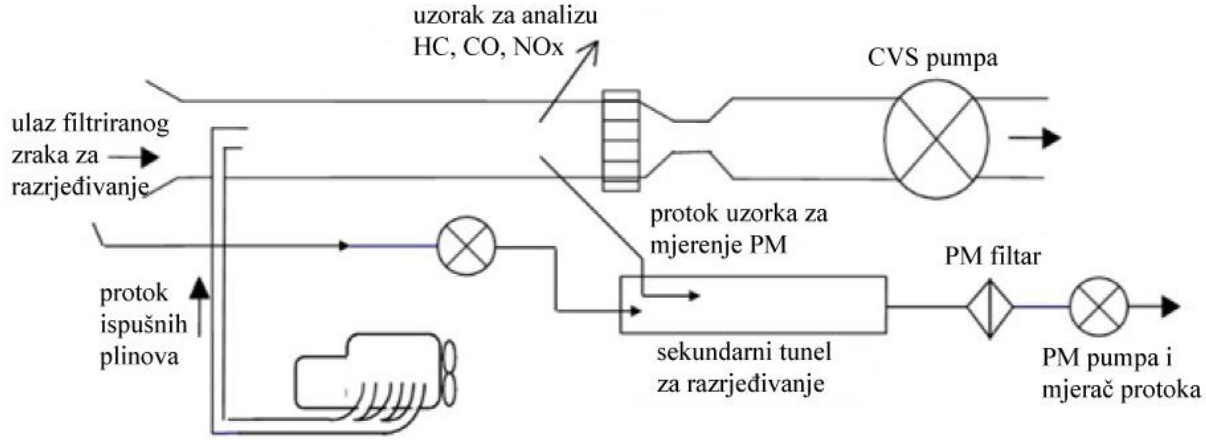
U sustavu za razrjeđivanje ukupnog protoka prikupljaju se svi ispušni plinovi iz MSUI te se razrjeđuju u tunelu za razrjeđivanje. Prikupljanjem i razrjeđivanjem ukupnog protoka ispušnih plinova unutar konstantnog volumena smanjuju se promjene temperature i tlaka, čime se pojednostavljuje proces uzorkovanja. Ukupan protok kroz sustav precizno se kontrolira.

Sustav, prikazan na slici 5., funkcionira na način da se čitavi protok ispušnih plinova usmjeravaja u tunel za razrjeđivanje. Ondje se ispušni plinovi miješaju s pretkondicioniranim

zrakom za razrjeđivanje. Unutar tunela održava se konstantan ukupni protok, a omjer razrjeđivanja je promjenjiv, posebice prilikom nestacionarnih ispitnih ciklusa. U tunel se postavlja sonda koja uzima uzorak razrijeđenih ispušnih plinova na kojem se zatim provode mjerenja ili sekundarno razrjeđivanje.

Sustav za sekundarno razrjeđivanje preuzima dio protoka i dodatno ga razrjeđuje s ciljem postizanja potrebnog ukupnog omjera razrjeđenja i sniženja temperature razrijeđenih ispušnih plinova za uzorkovanje krutih čestica. Za sekundarni sustav razrjeđivanja može se upotrebljavati i sustav razrjeđivanja djelomičnog protoka opisan u točki 2.1.2. Tada se pomoću stalnog omjera razrjeđivanja dodatno razrjeđuje protok uzorka proporcionalan ukupnom protoku.

Uzorkovanje iz konstantnog volumena omogućava jednostavno određivanje ukupne mase ili broja krutih čestica tijekom ispitivanja budući da je protok uzorka proporcionalan ukupnom protoku kroz tunel za razrjeđivanje. Uz poznati put koji vozilo prijeđe tijekom ispitivanja ili energiju koju proizvede MSUI ispitivanog stroja izračunavaju se vrijednosti emisija.

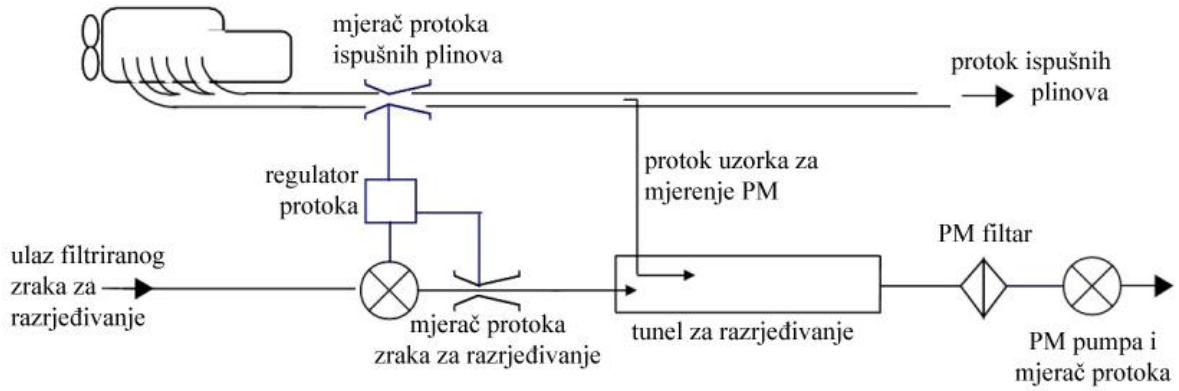


Slika 5. Shematski prikaz sustava za razrjeđivanje ukupnog protoka s primarnim i sekundarnim tunelom za razrjeđivanje prije mjerenja mase PM [7]

2.1.2. Razrjeđivanje djelomičnog protoka

Razrjeđivanje djelomičnog protoka razlikuje se od razrjeđivanja ukupnog protoka u tome što se umjesto ukupnog protoka ispušnih plinova izdvaja i razrjeđuje manji dio. Protok uzorka protoka ispušnih plinova mora biti proporcionalan ukupnom protoku što zahtjeva mjerenje ukupnog protoka ispušnih plinova i mogućnost brze korekcije protoka unutar tunela za razrjeđivanje sukladno izmjerenim promjenama.

Shematski prikaz sustava za uzorkovanje djelomičnog protoka prikazan je na slici 6.



Slika 6. Shematski prikaz PFD sustava za uzorkovanje i razrjeđivanje protoka ispušnih plinova prije mjerenja mase PM [7]

Iz protoka ispušnih plinova sondom za uzorkovanje prikuplja se uzorak čiji se protok usmjerava u tunel za razrjeđivanje. Istovremeno se u tunel usmjerava i filtrirani zrak za razrjeđivanje koji se u tunelu miješa s uzorkom ispušnih plinova. Protokom zraka za razrjeđivanje upravlja regulator protoka na osnovu izmjerene vrijednosti masenog protoka ispušnih plinova na vlažnoj bazi ili alternativno na osnovu izmjerenog masenog protoka ulaznog zraka na vlažnoj bazi i masenog protoka goriva. Protok zraka za razrjeđivanje mjeri se prije ulaska u tunel za razrjeđivanje. Mjeri se i ukupni protok sustava te se na temelju dvaju izmjerenih protoka izračunava omjer razrjeđivanja. Ukupni protok sustava održava se PM pumpom koja se nalazi iza PM filtra.

2.2. Mjerenje mase krutih čestica

Mjerenje mase PM osnovna je metoda mjerenja emisija krutih čestica MSUI. Do pojave mjerenja broja krutih čestica u ispušnim plinovima bila je to i jedina propisana metoda na temelju koje se procjenjivao udio krutih čestica u ispuhu MSUI. Mjerenje mase PM provodi se iz razrijeđenog uzorka ispušnih plinova na način da se uzorak provodi kroz filtar na koji se talože krute čestice iz uzorka. Zatim se masa taloga određuje mjerenjem ispunjenog filtra na gravimetarskoj vagi.

Napretkom sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova i postrožavanjem kontrole emisija MSUI ova metoda pokazala se nedostatnom za određivanje stvarnog stanja po pitanju emisija krutih čestica. Razlog je tome nemogućnost detekcije niskih masenih emisija PM suvremenih MSUI konvencionalnim vaganjem, budući da masa PM prikupljenih na stijenci filtra predstavlja tek mali iznos u odnosu na masu filtra. Iznos mase PM tri reda veličina manji je od iznosa mase filtra [8], što znači da je potrebno mjeriti veličine vrlo bliske masi

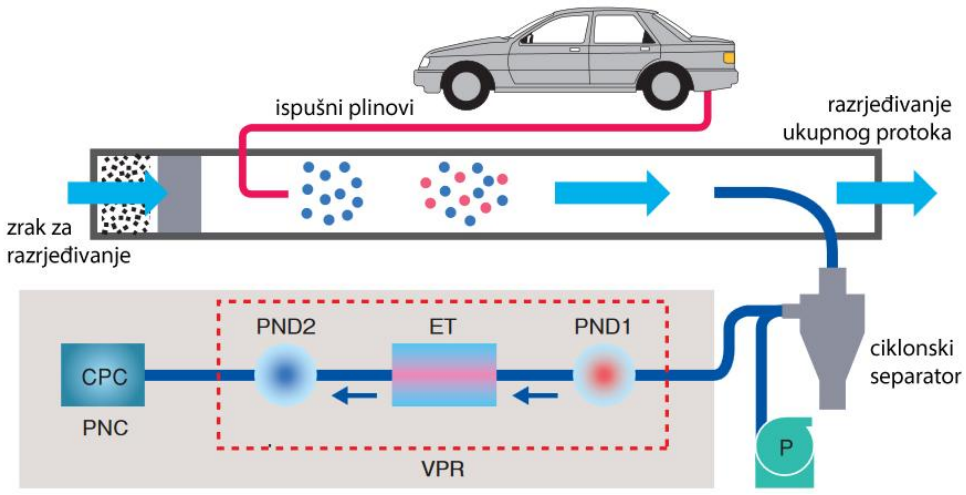
praznog filtra pa se pojavljuju problemi s granicama razlučivosti same metode. Problemi se javljaju i s uređajima za kontinuirano mjerenje mase PM. Oni također dostižu svoje granice mogućnosti pri mjerenju mase malih čestica i niskih koncentracija, kada je smanjena osjetljivost metode.

Ugradnjom filtara krutih čestica (DPF) u vozila i strojeve pogonjene Dieselovim MSUI javlja se još jedan problem na koji primjenom ove metode nije moguće ponuditi rješenje. Naime, mjerenjem mase PM nije moguće provjeriti učinkovitosti rada DPF-a. Razlog je tome što masa PM u ispušnim plinovima nije izravno ovisna o stanju DPF-a (ispunjenost, poroznost) pa se iz izmjerene mase PM ne može jasno zaključiti radi li DPF ispravno ili ne. Neispravan DPF može i dalje prikupljati većinu mase PM, ali istovremeno i propuštati velik broj krutih čestica što je teško detektirati korištenjem ove metode mjerenja.

Zbog navedenih problema vezanih uz mjerenje mase, uvedena je dodatna metoda mjerenja emisija krutih čestica – mjerenje broja krutih čestica (PN) u ispušnim plinovima. Mjerenje PN preciznija je i brža metoda mjerenja od mjerenja mase PM, a pruža i bolju razlučivost pri niskim emisijama [8].

2.3. Sustav za mjerenje broja čestica

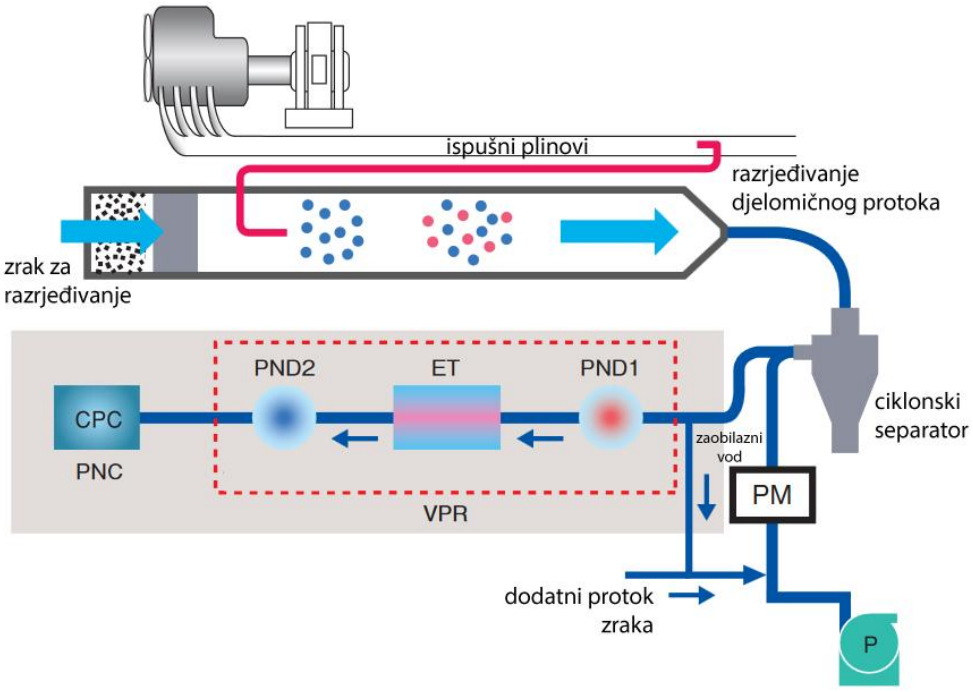
Mjerenje kojim se utvrđuju emisije PN u ispušnim plinovima provodi se kontinuiranim uzorkovanjem iz sustava za razrjeđivanje djelomičnog protoka ili iz sustava za razrjeđivanje ukupnog protoka. Na slikama 7. i 8. shematski su prikazani primjeri sustava za mjerenje broja čestica.



Slika 7. Shematski prikaz sustava za mjerenje broja krutih čestica nakon razrjeđivanja ukupnog protoka ispušnih plinova [9]

Sustav za mjerenje broja krutih čestica mora sadržavati sljedeće komponente:

1. Sustav za prijenos krutih čestica sa sondom za uzorkovanje kojom se izdvaja uzorak iz homogeno izmiješanog protoka u sustavu za razrjeđivanje;
2. Predklasifikator (separator) čestica;
3. Odvajač hlapljivih čestica (VPR);
4. Jedinicu za mjerenje brojčane koncentracije čestica (PNC).



Slika 8. Shematski prikaz sustava za mjerenje broja krutih čestica nakon razrjeđivanja djelomičnog protoka ispušnih plinova [9]

Vrh sonde za uzorkovanje i cijev za prijenos čestica zajedno čine sustav za prijenos čestica koji provodi uzorak od tunela za razrjeđivanje do odvajača hlapljivih čestica (VPR). Uzorak prije dolaska do odvajača hlapljivih čestica prolazi kroz predklasifikator. Vrh sonde za uzorkovanje postavlja se unutar trakta za razrjeđivanje na način da se omogući uzimanje reprezentativnog uzorka protoka plina iz homogene smjese sredstva za razrjeđivanje i ispušnih plinova. Pri tome zbroj vremena zadržavanja u sustavu i vremena odziva brojača čestica ne smije biti veći od 20 sekundi.

Odvajač hlapljivih čestica (VPR) sastoji se od serijski povezanih uređaja za razrjeđivanje PND_1, cijevi za isparavanje (ET) i uređaja za razrjeđivanje PND_2. Razrjeđivanje

se provodi s ciljem sniženja koncentracije krutih čestica ispod praga brojača čestica (PNC) i kako bi se spriječila nukleacija unutar uzorka.

2.4. Uloge i zahtjevi za komponente sustava za uzorkovanje

Za učinkovito mjerenje sve komponente sustava za uzorkovanje i razrjeđivanje moraju obavljati svoje predviđene uloge na odgovarajući način i s odgovarajućom točnošću.

2.4.1. Sustav za prijenos čestica

Sustav za prijenos čestica ima ulogu izdvojiti dio protoka iz tunela za razrjeđivanje te prenijeti uzorak do odvajača hlapljivih čestica. Izdvajanje uzorka iz tunela za razrjeđivanje obavlja sonda za uzorkovanje, dok su za prijenos uzorka zadužene cijevi za prijenos čestica.

Kod sustava za razrjeđivanje ukupnog protoka sonda za uzorkovanje mora se ugraditi u blizini simetrale tunela za uzorkovanje, na udaljenosti od 10 do 20 promjera tunela iza ulaza plina u tunel. Sonda mora biti okrenuta prema toku plina tako da je os na vrhu sonde paralelna s osi tunela za razrjeđivanje. Sonda se mora postaviti tako da se uzorak uzima iz homogene razrijeđene smjese.

Kod sustava za razrjeđivanje djelomičnog protoka sonda za uzorkovanje mora biti ugrađena u cijevi za prijenos čestica ispred držača filtra čestica, uređaja za mjerenje protoka i točke račvanja uzorka. Pri čemu se uzorak uzima iz homogene razrijeđene smjese.

Sustav mora biti izveden tako da ispušni plin zadovoljava sljedeće zahtjeve:

- Reynoldsov broj (Re) < 1700;
- vrijeme zadržavanja u sustavu za prijenos čestica $t_z \leq 3$ s.

Izlazna cijev koja odvodi uzorak od odvajača hlapljivih čestica do brojača čestica mora zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- unutarnji promjer $d_u \geq 4$ mm;
- vrijeme zadržavanja protoka uzorka plina kroz izlaznu cijev $t_z \leq 0{,}8$ s.

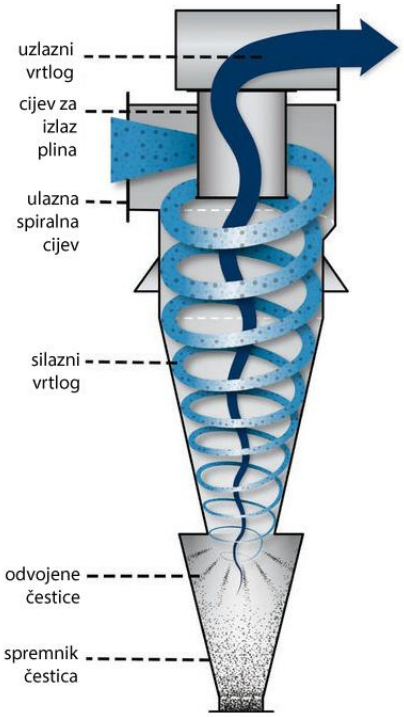
2.4.2. Predklasifikator čestica

Predklasifikator čestica ima ulogu odvojiti krupne čestice iz uzorka. Za predklasifikator koriste se uređaji kao što su ciklonski ili inercijski separator, čiji su principi rada shematski prikazani na slikama 9. i 10.

2.4.2.1. Ciklonski separator (ciklon)

Ciklonski separator služi za odvajanje čestica iz struje plina, a radi na sljedeći način:

- Struja plina ulazi u separator tangencijalno na stijenku. Pri tome se stvara vrtlog koji se spušta prema dnu separatora, nakon čega se izdiže duž središnje osi tvoreći tako uzlazni vrtlog te na posljetku izlazi i iz ciklona kroz otvor na vrhu.
- Krupnije čestice zbog djelovanja centrifugalne sile udaraju u stijenku ciklona pri čemu gube kinetičku energiju i padaju na dno te se na taj način izdvajaju iz struje plina.
- Sitnije čestice bolje prate putanju vrtloga i zadržavaju se bliže središnjoj osi ciklona te se pod djelovanjem uzlaznog vrtloga uzdižu i izlaze iz ciklona kroz otvor na vrhu.

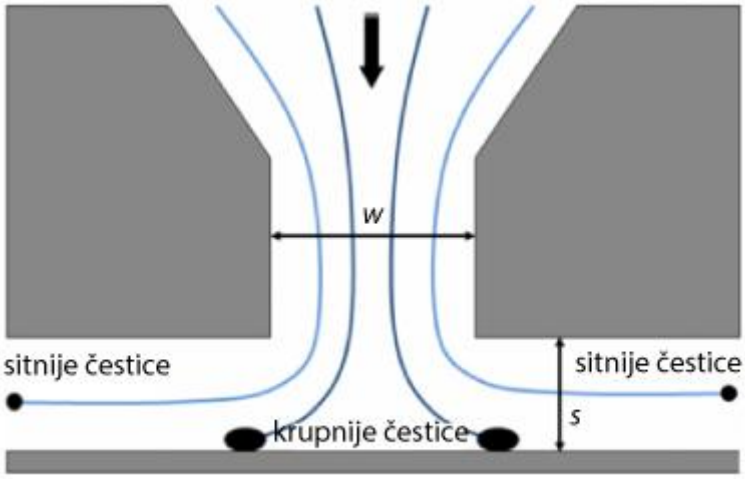


Slika 9. Shematski prikaz rada ciklonskog separatora [10]

2.4.2.2. Inercijski separator

Inercijski separator ima istu namjenu kao i ciklonski, a radi na sljedeći način:

- Struja plina prolazi kroz mlaznicu separatora i naliječe na ploču što uzrokuje naglu promjenu smjera strujanja.
- Krupnije čestice zbog inercije ne mogu pratiti naglu promjenu smjera strujanja te zatim udaraju u ploču separatora te se na taj način izdvajaju iz struje.
- Sitnije čestice nastavljaju u smjeru strujanja i izlaze iz separatora.



Slika 10. Shematski prikaz rada inercijskog separatora (*w* – promjer mlaznice, *s* – udaljenost mlaznice i ploče separatora) [11]

2.4.2.3. Zahtjevi za predklasifikator čestica

Ugrađeni predklasifikator čestica mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- mora biti postavljen ispred VPR-a;
- promjer čestica za 50-postotnu graničnu točku mora biti između 2,5 i 10 μm pri volumetrijskom protoku;
- mora omogućiti da pri volumetrijskom protoku najmanje 99 % masene koncentracije čestica od 1 μm koje uđu u predklasifikator prođe i kroz izlaz.

2.4.3. Odvajač hlapljivih čestica (VPR)

Odvajač hlapljivih čestica koristi se za uklanjanje tekućih hlapljivih komponenti ispušnih plinova, kao što su: vodena para, neizgoreni ugljikovodici, sumporna kiselina (H_2SO_4) ili SO_x. Osim uklanjanja potrebno je osigurati i sprječavanje ponovne kondenzacije i nukleacije navedenih komponenti prije ulaska razrijeđenih ispušnih plinova u brojač čestica.

Kako bi odvajač hlapljivih čestica mogao ispuniti svoju ulogu mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- grijanjem i smanjenjem parcijalnih tlakova tetrakontana[2] postići > 99 % isparavanja čestica tetrakontana promjera 30 nm, ulazne koncentracije ≥ 10000 cm^{-3};

[2] Zasićeni ugljikovodik kemijske formule $CH_3(CH_2)_{38}CH_3$, referentna tvar za određivanje učinkovitosti odvajanja hlapljivih čestica.

- postići faktor smanjenja koncentracije čestica:
  - f_r < 30 % - za čestica promjera električne mobilnosti[3] od 30 nm;
  - f_r < 20 % - za čestica promjera električne mobilnosti od 50 nm;
  - f_r najviše 5 % manji od onoga za čestice promjera električne mobilnosti od 100 nm.

2.4.3.1. Uređaj za razrjeđivanje broja čestica PND_1

PND_1 prvi je dio odvajača hlapljivih čestica u kojem se dodatno razrjeđuje uzorak vrućeg ispušnog plina nakon primarnog razrjeđivanja. Pritom PND_1 mora zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- rad na temperaturi stijenke: 150 °C ≤ T_{PND1} ≤ 400 °C;
- stalna nazivna radna temperatura – najveće odstupanje ± 10°C;
- temperatura stijenke (T_{PND1}) manja od temperature stijenke cijevi za isparavanje (T_{ET});
- rad sa zrakom filtriranim HEPA filtrom;
- faktor razrjeđivanja od 1:10 do 1:200.

2.4.3.2. Cijev za isparavanje

Sljedeći dio odvajača hlapljivih čestica je cijev za isparavanje koja ima ulogu isparavanja hlapljivih čestica.

Cijev za isparavanje mora zadovoljavati sljedeće uvjete:

- temperatura stijenke: 300 °C ≤ T_{ET} ≤ 400 °C;
- $T_{ET} \geq T_{PND1}$;
- stalna nazivna radna temperatura – najveće odstupanje ± 10 °C.

2.4.3.3. Uređaj za razrjeđivanje broja čestica PND_2

Nakon prolaska kroz cijev za isparavanje uzorak ispušnih plinova ponovno se razrjeđuje u PND_2. Razrjeđivanjem se postiže hlađenje uzorka kako bi se spriječila ponovna kondenzacija i nukleacija hlapljivih čestica.

[3] Promjer električne mobilnosti čestice – promjer sfere čija je prosječna brzina zanošenja (driftna brzina) u električnom polju jednaka driftnoj brzini čestice

PND_2 mora zadovoljavati sljedeće uvjete:

- rad sa zrakom filtriranim HEPA filtrom;
- stalan faktor razrjeđivanja od 1:10 do 1:30;
- odabir faktora razrjeđivanja mora biti takav da brojčana koncentracija čestica u razrijeđenom ispušnom plinu na ulazu u brojač bude ispod gornje granice brojača;
- temperatura plina na ulazu u brojač $T_{raz.\ pl.} < 35$ °C.

2.4.4. Brojač čestica (PNC)

Brojač čestica detektira preostale krute čestice u razrijeđenom uzorku ispušnog plina primjenom jedne od metoda za određivanje broja čestica: kondenzacijsko brojanje čestica, difuzijska metoda s efektom korone.

Zahtjevi za brojač čestica su sljedeći:

- omogućen rad u uvjetima punog protoka;
- točnost brojanja ± 10 % u području 1 cm^{-3} do gornjeg praga brojača u načinu rada brojanja pojedinačne čestice u odnosu na sljedivi standard;
- mogućnost očitavanja najmanje 0,1 cm^{-3} pri koncentracijama ispod 100 cm^{-3};
- linearan odziv na koncentracije čestica u cijelom mjernom području u načinu rada brojanja pojedinačnih čestica;
- frekvencija dojave podataka ≥ 0,5 Hz;
- mogućnost korigiranja koincidencije do najviše 10 % korekcije i mogućnost upotrebe internog umjernog faktora (k);
- učinkovitost brojanja čestica:
  - 50 ± 12 % - za čestice s promjerom električne mobilnosti od 23 ± 1 nm;
  - > 90 % - za čestice s promjerom električne mobilnosti 41 ± 1 nm;
- promjena radne tekućine frekvencijom propisanom od strane proizvođača instrumenta.

2.5. Metode određivanja broja krutih čestica

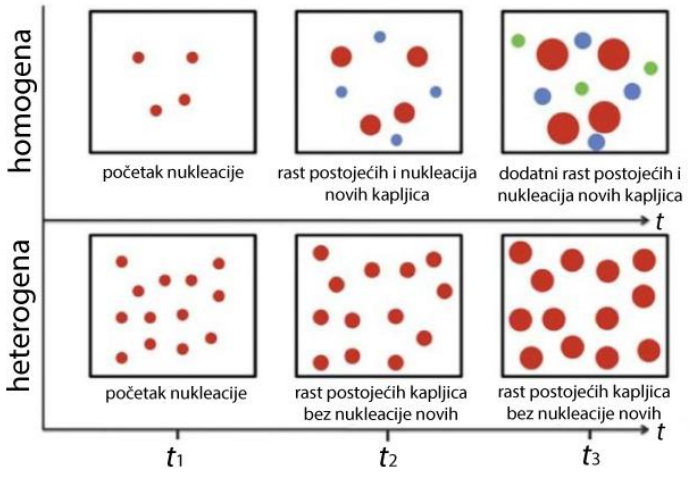
Određivanje broja krutih čestica u ispitnom uzorku ispušnih plinova MSUI obavlja se pomoću brojača krutih čestica. Budući da uobičajeni optički brojači čestica u pravilu nemaju sposobnost detektiranja čestica promjera manjeg od 50 nm, za određivanje broja krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI moraju se koristiti uređaji veće razlučivosti.

U praktičnoj primjeni ustalile su se dvije metode određivanja broja krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI:

1. Kondenzacijsko brojanje čestica – CPC (engl. *Condensation Particle Counter*);
2. Difuzijska metoda s efektom korone – DC (engl. *Diffusion Charging*).

2.5.1. Kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)

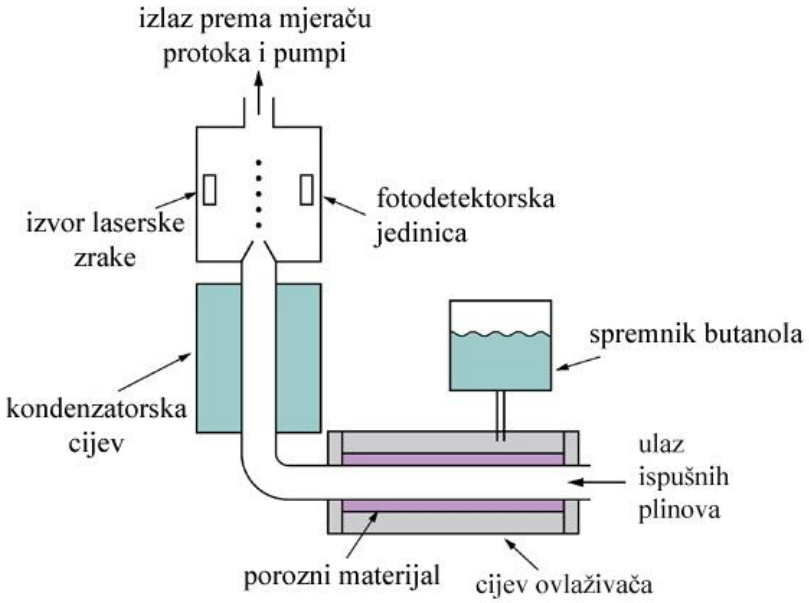
Uporaba CPC mjernog instrumenta najčešći je način određivanja broja krutih čestica u ispušnom plinu MSUI, jer omogućuje detekciju nano-čestica i do promjera 2 nm koje nisu vidljive uobičajenim optičkim brojačima. To se postiže zasićenjem uzorka alkoholnom parom, što uzrokuje heterogenu nukleaciju krutih čestica do veličine prihvatljive za detekciju (d_p > 1 μm). Heterogena nukleacija podrazumijeva kondenzaciju alkoholnih para na postojećim krutim česticama što dovodi do njihovog rasta.



Slika 11. Usporedba homogene i heterogene nukleacije u vremenu [12]

Krute čestice raspršene u prezasićenoj pari formiraju jezgre iz kojih se kondenzacijom oblikuju kapljice. Jezgre se formiraju već pri niskoj zasićenosti, a zasićenost uzorka održava se na vrijednostima 100 – 200 % čime se postiže željeni efekt heterogene nukleacije. Bitno je da zasićenost ne prelazi kritične vrijednosti pri kojima nastupa homogena nukleacija, odnosno

formiranje kondenzata i u dijelovima uzorka u kojima nisu prisutne krute čestice, što je vidljivo na slici 11.



Slika 12. Shematski prikaz CPC brojača krutih čestica [16]

Metoda kondenzacijskog brojanja čestica, shematski prikazana na slici 12., sastoji se od tri faze:

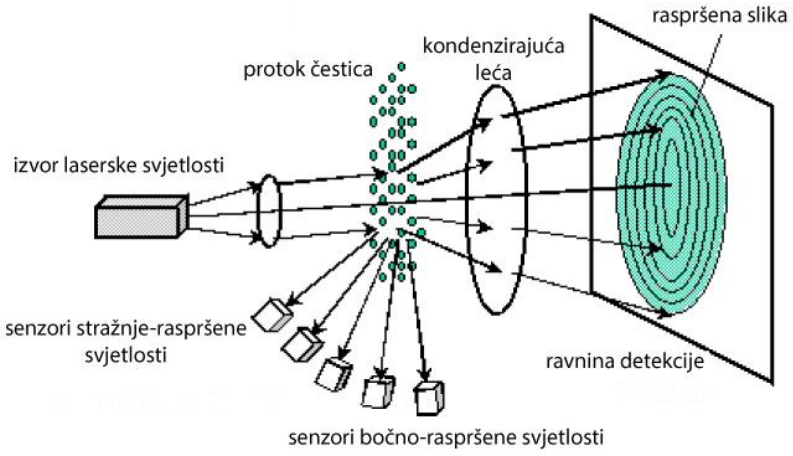
1. Faza zasićenja – razrijeđeni uzorak ispušnih plinova prolazi kroz cijev ovlaživača koja je obložena poroznim materijalom natopljenim alkoholom butanolom u kojoj se ispušni plin zasićuje alkoholnim parama;
2. Kondenzatorska faza – uzorak ispušnih plinova prolazi kroz kondenzatorsku cijev u kojoj se uzorak rashlađuje pri čemu dolazi do prezasićenja. Prezasićenje alkoholim parama uzrokuje heterogenu nukleaciju krutih čestica i formiranje kapljica u uzorku;
3. Optička faza – prezasićeni uzorak prolazi kroz mlaznicu i usmjerava se kroz lasersku zraku optičkog brojača. Krute čestice detektiraju se pomoću fotodetektora te se utvrđuje njihov broj.

Najmanja veličina krutih čestica koje se mogu detektirati ovom metodom određena je postignutim stupnjem prezasićenja uzorka koji ovisi o razlici temperatura cijevi ovlaživača i kondenzacijske cijevi. Tijekom ispitivanja ne postiže se jednako zasićenje kod svih krutih čestica u uzorku te je iz tog razloga učinkovitost uređaja veća za čestice većeg promjera.

CPC uređaji najčešće mogu raditi u dva različita načina rada:

1. brojanje pojedinačnih čestica (engl. *counting mode*) ili
2. način rada ukupnog intenziteta svjetlosti (engl. *total intensity mode*).

U prvom načinu rada prebrojavaju se impulsi raspršene svjetlosti pojedinačnih krutih čestica, dok se kod drugog načina rada brojčana koncentracija čestica utvrđuje iz ukupnog intenziteta raspršene svjetlosti svih čestica u zoni detekcije. Način rada brojanja pojedinačnih čestica precizniji je, no moguće ga je primjenjivati samo pri niskim koncentracijama čestica. Način rada ukupnog intenziteta svjetlosti upotrebljava se uglavnom za koncentracije čestica veće od 10^4 cm^{-3} [17]. Takav način rada, shematski prikazan na slici 13., manje je precizan i zahtjeva jednoliku veličinu čestica te učestalo umjeravanje sustava.



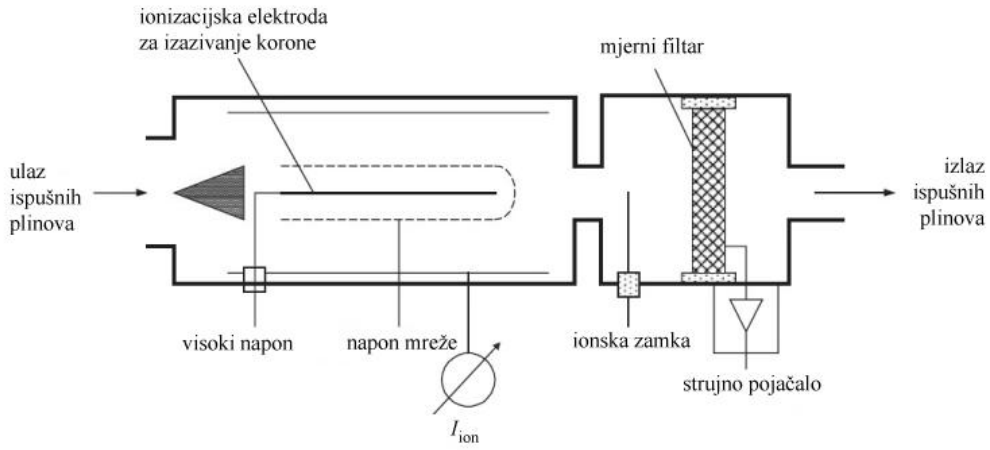
Slika 13. Shematski prikaz načina rada ukupnog intenziteta svjetlosti [18]

Laserska svjetlost usmjerava se na protok čestica pri čemu se svjetlost raspršena prema naprijed, u odnosu na izvor svjetlosti, prikuplja kondenzirajućom lećom i formira se raspršena slika na ravnini detekcije na kojoj su koncentrično smješteni senzori. Svjetlost koja se nakon sudara sa česticama raspršuje u ostalim smjerovima detektira se bočnim i stražnjim senzorima.

Osim butanola, koji je najčešće korištena radna tvar, neki uređaji kao radnu tvar upotrebljavaju vodu. Zasićenje se tada postiže prolaskom uzorka kroz vlažnu cijev pri čemu se izjednačava temperatura uzorka s temperaturom stijenke. Uzorak zatim prolazi kroz zagrijani dio cijevi, što uzrokuje porast tlaka para, a uzorak postaje prezasićen vodenom parom zbog veće brzine difuzije vodene pare od difuzije topline.

2.5.2. Difuzijska metoda s efektom korone

Difuzijska metoda, shematski prikazana na slici 14., alternativan je način određivanja broja krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI. Metoda se zasniva na efektu korone pri čemu se na krute čestice unutar mjernog uzorka vežu ioni s određenim električnim nabojem na temelju kojeg se određuje brojčana koncentracija krutih čestica u uzorku.

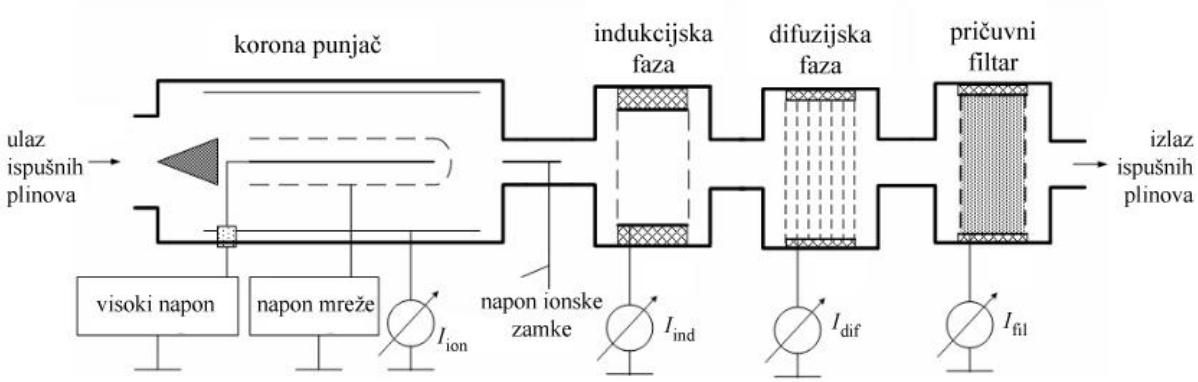


Slika 14. Shematski prikaz određivanja broja krutih čestica pomoću difuzijske metode [13]

Mjerenje difuzijskom metodom sastoji se od nekoliko faza:

1. Struja ispušnih plinova s krutim česticama najprije ulazi u korona punjač. U njemu se nalazi ionizacijska elektroda pod visokim naponom za izazivanje korone, separacijska žičana mreža koja sprječava gubitak krutih čestica zbog elektrostatičke precipitacije te elektroda za mjerenje električne struje iona;
2. Zbog efekta korone nastaju ioni, od kojih dio prolazi kroz separacijsku mrežu i veže se difuzijom za krute čestice uzorka. Regulacijom napona struje na ionizacijskoj elektrodi održava se konstantna koncentracija iona;
3. Ionizirana struja ispušnih plinova izlazi iz korona punjača preko ionske zamke. Električno polje ionske zamke služi za izdvajanje slobodnih iona koji nisu vezani za krute čestice u uzorku;
4. U difuzijskoj fazi procesa krute čestice ispušnih plinova talože se na mjernom filtru pri čemu se inducira električna struja. Na mjerni filtar priključeno je strujno pojačalo koje pojačava i mjeri jakost električne struje;
5. Na temelju izmjerene jakosti električne struje na strujnom pojačalu izračunava se brojčana koncentracija krutih čestica.

Jakost električne struje izmjerene na strujnom pojačalu ovisi o brojčanoj koncentraciji krutih čestica (PN), prosječnom naboju čestica te vjerojatnosti taloženja čestica na mjernom filtru difuzijom [18]. U slučaju kada se samo mali dio čestica taloži na mjernom filtru difuzijom, tada je izmjerena jakost električne struje proporcionalna broju čestica.



Slika 15. Shematski prikaz uređaja DiSC koji primjenjuje difuzijsku metodu za određivanje broja krutih čestica [19]

Sustav (uređaj) za određivanje broja krutih čestica difuzijskom metodom može biti izveden i s dodatnom indukcijskom fazom te pričuvnim filtrom, kao što je prikazano na slici 15. U indukcijskoj fazi uzorak prolazi kroz *Faradayev* kavez pri čemu se mjeri jakost inducirane električne struje. Na temelju razlike jakosti električne struje izmjerene u indukcijskoj i difuzijskoj fazi izračunava se PN. Pričuvni filtar ima ulogu prihvaćanja većih krutih čestica koje prolaze kroz mjerni filtar. Pričuvni filtar također je priključen na strujno pojačalo te se i na tom mjestu mjeri jakost električne struje. Budući da se na mjernom filtru mjeri jakost električne struje sitnih krutih čestica, a na pričuvnom filtru jakost električne struje krupnijih čestica iz omjera tih dvaju jakosti moguće je izračunati prosječnu vrijednost promjera krutih čestica u ispitnom uzorku.

3. PREGLED ANALIZATORA ZA BROJANJE KRUTIH ČESTICA U ISPUŠNIM PLINOVIMA MSUI

Za analizu ispušnih plinova MSUI upotrebljava se niz instrumenata, različitih tehničkih karakteristika, konfiguracija i metoda mjerenja. Isto vrijedi i za analizu brojčane koncentracije krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI, odnosno za mjerenje PN. U prethodnom poglavlju objašnjene su metode utvrđivanja broja krutih čestica prema kojima se provode ispitivanja u praktičnoj primjeni, a u ovom će dijelu biti dan pregled uređaja zasnovanih na tim metodama. U primjeni su prisutni mjerni instrumenti različitih proizvođača kao što su sljedeći uređaji i serije uređaja: *AVL APC^{plus}, Sokken PMS-M2, Grimm CPC 5430 i 5431, Horiba OBS-ONE-PN, Horiba MEXA-2000SPCS Series, Airmodus A23 CPC, TSI 3790, AVL M.O.V.E PN PEMS iS, Pegasor Mi3, Testo NanoMet3*. Dio navedenih uređaja, za koje su poznate i javno dostupne tehničke karakteristike, bit će opisani u daljnjem tijeku rada.

Osim prema prethodno opisanim metodama mjerenja, analizatore je moguće podijeliti i prema mjestu, odnosno načinu provođenja ispitivanja. Prema tome postoje dvije skupine analizatora broja krutih čestica:

1. Stacionarni analizatori;
2. Prijenosni analizatori.

Stacionarni analizatori namijenjeni su isključivo određivanju broja krutih čestica u laboratorijskim uvjetima, dok prijenosni analizatori omogućuju provođenje mjerenja i na vozilima i strojevima tijekom njihovog kretanja. U skladu s time, stacionarni su uređaji u pravilu precizniji i složenije konfiguracije od prijenosnih, koji su pak zbog kompaktnije izvedbe pogodni za ugrađivanje u prijenosne sustave za mjerenje emisija (PEMS).

3.1. Stacionarni analizatori

Stacionarni analizatori koriste se za provođenje laboratorijskih ispitivanja. Najčešće su dio složenog sustava za za uzorkovanje, razrjeđivanje i mjerenje emisija.

3.1.1. AVL APC^{plus}

APC^{plus} uređaj je za mjerenje broja krutih čestica u ispušnim plinovima proizvođača *AVL List GmbH*. Uređaj primjenjuje CPC metodu određivanja broja čestica i njime je omogućena analiza ispušnih plinova razrjeđivanjem punog protoka, djelomičnog protoka ili analiza ispušnih plinova bez prethodnog razrjeđivanja. Uređaj, prikazan na slici 16., izveden je sa sustavom za prijenos krutih čestica i odvajačem hlapljivih čestica, a namijenjen je laboratorijskoj uporabi.

Postoje tri različite varijante uređaja *APC^{plus}*:

1. Certifikacijska;
2. Napredna;
3. Napredna za mjerenje emisije krutih čestica promjera manjeg od 23 nm.



Slika 16. Stacionarni analizator *AVL APC^{plus}* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [20]

Varijante analizatora međusobno se razlikuju u konfiguraciji i performansama.

Tehničke karakteristike napredne varijante uređaja *APC^{plus}* za mjerenje emisije krutih čestica promjera manjeg od 23 nm prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *AVL APC^{plus}* za mjerenje emisije krutih čestica promjera manjeg od 23 nm (engl. *Advanced for sub 23 nm*)

Detekcija krutih čestica		
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	CVS, PFDS, bez razrjeđivanja	
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	0 ÷ 30 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
Linearnost koncentracije	do 50 000 cm^{-3} (R^2 > 0,95)	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 10 nm	> 50 %
	d_p = 15 nm	> 90 %
Prosječno vrijeme odziva instrumenta (t_{90})	4,5 s	
Prosječno vrijeme odziva CPC senzora (t_{90})	2 s	
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	5 °C ÷ 25 °C (do 35 °C uz dodatna kolica za hlađenje)	
Temperatura ispušnih plinova	≤ 600 °C	
Tlak ispušnih plinova	± 200 mbar	
Protok uzorka	5 dm^3/min (razrijeđeni), 4 – 7 dm^3/min (nerazrijeđeni)	
Potrošnja zraka za razrjeđivanje	< 40 l/min	
Karakteristike komponenti sustava		
Faktori razrjeđivanja	PND_1	1:10 – 1:1000
	PND_2	1:10
	Ukupni	1:100 – 1:1000
Učinkovitost uklanjanja hlapljivih čestica	≥ 99 % za čestice tetrakontana	
Temperatura cijevi za isparavanje	300 – 370 °C	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	482 x 445 x 650 mm	
Masa uređaja	~ 55 kg	
Opskrba električnom energijom	90 ÷ 240 V AC, 50/60 Hz, ~ 850 W	

3.1.2. Grimm 5431

Uređaj za mjerenje broja krutih čestica oznake *5431* proizvođača *Grimm Aerosol Technik* namijenjen je određivanju broja krutih čestica u ispušnim plinovima vozila primjenom CPC metode. Unutar uređaja nalazi se integrirana pumpa za dobavu uzorka te odvajač hlapljivih čestica. Uređaj, prikazan na slici 17., namijenjen je za stacionarnu uporabu. Uređaj za ovlaživanje unutar brojača krutih čestica konstruiran je na način da se integriranim zatvaračem spriječi prolijevanje radne tvari što omogućuje transport bez njegova uklanjanja ili isušivanja saturatora. Tehničke karakteristike uređaja *Grimm 5431* prikazane su u tablici 2.



Slika 17. Stacionarni analizator *Grimm 5431* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [21]

Tablica 2. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *Grimm 5431*

Detekcija krutih čestica		
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	CVS, PFDS, bez razrjeđivanja	
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	0 ÷ 23 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
Linearnost koncentracije	1 ÷ 23 000 cm^{-3} ($R^2 \geq 0,98$)	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 23 nm	50 ± 12 %
	d_p = 41 nm	≥ 90 %
Vrijeme odziva instrumenta (t_{10-90})	< 3 s	
Korekcija koincidencije	< 10 % do 23 000 cm^{-3}	
Mogućnost očitavanja	0,1 cm^{-3}	
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	10 °C ÷ 40 °C	
Relativna vlažnost zraka	0 ÷ 95 %	
Apsolutni tlak zraka	600 ÷ 1050 mbar	
Radna tvar	alkohol butanol	
Protok uzorka	0,6 dm^3/min	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	226 x 254 x 223 mm	
Masa uređaja	8,9 kg	
Opskrba električnom energijom	85 ÷ 264 V AC, 47 ÷ 460 Hz, 80 ÷ 130 W	

3.1.3. Horiba MEXA-2200SPCS

MEXA-2000SPCS oznaka je serije uređaja koji služe za mjerenje broja krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI proizvođača mjerne opreme *Horiba Ltd.* Uređaji unutar serije međusobno se razlikuju prema konfiguraciji i namjeni. Uređaj naziva *MEXA-2200SPCS,* prikazan na slici 18., namijenjen je ponajprije ispitivanju sukladnosti MSUI vozila prema EURO 5/6 normama. Uređaj primjenjuje CPC metodu brojanja čestica i namijenjen je za stacionarnu uporabu, a konstruiran je s integriranim sustavom za prijenos čestica i odvajačem hlapljivih čestica. Uz osnovne komponente, u različitim konfiguracijama uređaju se ugrađuju i dodatne za funkcije hlađenja, povrata uzorka, provjere faktora razrjeđenja, vanjska ciklonska jedinica i dr. U tablici 3. prikazane su tehničke karakteristike uređaja *Horiba MEXA-2200SPCS.*



Slika 18. Stacionarni analizator *Horiba* serije *MEXA-2000SPCS* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [22]

Tablica 3. Tehničke karakteristike stacionarnog analizatora *Horiba MEXA-2200SPCS*

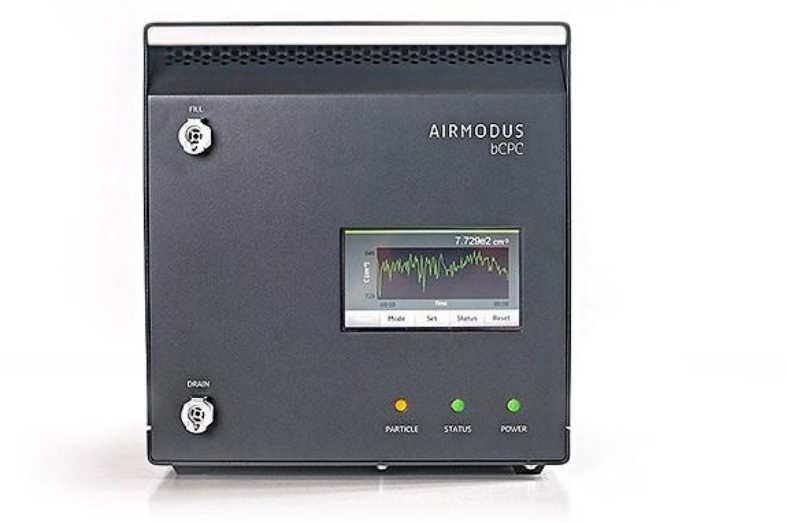
Detekcija krutih čestica		
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	CVS, PFDS	
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	0 ÷ 50 000 cm^{-3}	
Linearnost koncentracije	do 50 000 cm^{-3} (R^2 > 0,95)	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 23 nm	50 ± 12 %
	d_p = 41 nm	≥ 90 %
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	5 °C – 30 °C (do 45 °C uz dodatnu jedinicu za hlađenje)	
Relativna vlažnost zraka	0 ÷ 80 %	
Temperatura obrade uzorka	≤ 52 °C	
Karakteristike komponenti sustava		
Faktori razrjeđivanja	PND_1	1:10 – 1:200
	PND_2	1:15
Temperatura razrijeđenog uzorka	PND_1	191 °C ± 10 °C
	PND_2	≤ 35 °C
Učinkovitost uklanjanja hlapljivih čestica	≥ 99 % za čestice tetrakontana	
Temperatura cijevi za isparavanje	350 °C ± 10 °C	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	434 x 910 x 637 mm	
Masa uređaja	~ 140 kg	
Opskrba električnom energijom	200 ÷ 240 V AC, 50/60 Hz, do 240 kVA	

3.2. Prijenosni analizatori

Prijenosni analizatori namijenjeni su uporabi u sklopu PEMS sustava za praćenje emisija u realnim uvjetima uporabe vozila i strojeva izvan laboratorija.

3.2.1. Airmodus A23

Uređaj *Airmodus A23* namijenjen je za mjerenje broja krutih čestica većih od 23 nm, a primjenjuje CPC metodu. Uređaj (slika 19.) se može koristiti kao samostalni mjerni instrument ili kao brojač krutih čestica u različitim sustavima za mjerenje emisija. Osim uobičajenih komponenti, uređaj je opremljen zaslonom osjetljivim na dodir za podešavanje parametara ispitivanja. Uređaj je moguće koristiti za određivanje broja čestica promjera 23 nm $\leq d_p \leq$ 2,5 μm. Uređaj nema integrirani sustav za razrjeđivanje uzorka. Tehničke karakteristike uređaja *Airmodus A23* prikazane su u tablici 4.



Slika 19. Prijenosni analizator *Airmodus A23* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [23]

Tablica 4. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Airmodus A23*

Detekcija krutih čestica		
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	CVS, PFDS	
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	0 ÷ 30 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
	do 100 000 cm^{-3} (ukupni intenzitet svjetlosti)	
Linearnost koncentracije	do 30 000 cm^{-3}	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 23 ± 1 nm	50 % ± 12 %
	d_p = 41 ± 1 nm	> 90 %
Prosječno vrijeme odziva instrumenta	t_{90}	< 5 s
	t_{95}	1,15 s
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	15 °C – 35 °C	
Apsolutni tlak zraka	75 ÷ 105 kPa	
Relativna vlažnost zraka	0 ÷ 95 %	
Protok uzorka	1 dm^3/min	
Radna tvar	alkohol butanol	
Potreban izlazni tlak	100 ÷ 400 mbar (< 40 % ulaznog tlaka)	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	260 x 230 x 400 mm	
Masa uređaja	10,5 kg	
Opskrba električnom energijom	100 ÷ 240 V AC, do 320 W	

3.2.2. AVL M.O.V.E PN PEMS iS

Uređaj proizvođača *AVL List GmbH*, prikazan na slici 20., namijenjen je za analizu broja krutih čestica ispušnih plinova u sklopu PEMS sustava za praćenje emisija MSUI u stvarnim uvjetima uporabe, odnosno tijekom prometovanja cestovnih vozila i rada necestovnih pokretnih strojeva. *PN PEMS* sustav ugrađuje se na stražnji kraj vozila ili stroja (slika 21.), a u sebi sadržava integrirani sustav za uzorkovanje i razrjeđivanje uzorka. Mjerenje broja krutih čestica izvodi se prema difuzijskoj metodi s efektom korone. Tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 5.



Slika 20. Prijenosni analizator *AVL M.O.V.E PN PEMS iS* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje difuzijsku metodu [24]



Slika 21. *AVL PN PEMS* sustav za praćenje emisija u realnim uvjetima vožnje ugrađen na stražnji dio vozila [24]

Tablica 5. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *AVL M.O.V.E PN PEMS iS*

Detekcija krutih čestica		
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	PFDS	
Metoda mjerenja	difuzijska metoda s efektom korone (DC)	
Raspon mjerenja	do 2 x 10^7 cm^{-3}	
Frekvencija mjerenja	do 10 Hz	
Faktor razrjeđivanja	1:10 (konstantan)	
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	-10 °C ÷ 45 °C	
Nadmorska visina	do 3000 m	
Temperatura ispušnih plinova	≤ 500 °C na točki uzorkovanja	
	≤ 200 °C na ulazu u brojač	
Protok uzorka	0,5 dm^3/min	
Temperatura katalizatora	300 °C	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	507 x 193 x 374 mm	
Masa uređaja	Sklop VPR-a	~ 6 kg
	Ukupna	~ 16 kg
Opskrba električnom energijom	U = 22 ÷ 28 V DC, I_{max} = 28 A, P < 320 W	

3.2.3. Testo NanoMet3

Prijenosni analizator *NanoMet3* proizvođača *Testo* namijenjen je mjerenju emisija PN vozila u realnim uvjetima vožnje (slika 23.). Mjerenje se temelji na difuzijskoj metodi s efektom korone, a uređajem je osim broja krutih čestica moguće mjeriti i prosječni polumjer te masu čestica. Uređaj, prikazan na slici 22., opremljen je integriranim sustavom za uzorkovanje i razrjeđivanje ispušnih plinova. Tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 6.



Slika 22. Prijenosni analizator *Testo NanoMet3* koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje difuzijsku metodu [25]



Slika 23. Prijenosni analizator *Testo NanoMet3* za mjerenje broja krutih čestica postavljen u prtljažniku vozila [25]

Tablica 6. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Testo NanoMet3*

Detekcija krutih čestica	
Područje primjene (sustav za razrjeđivanje)	CVS, PFDS, bez razrjeđivanja
Metoda mjerenja	difuzijska metoda s efektom korone (DC)
Raspon mjerenja	$10^3 \div 10^6$ cm^{-3} (ispušni plinovi izravno iz ispuha)
	$10^4 \div 10^8$ cm^{-3} (s prethodnim razrjeđivanjem)
Veličina detektiranih čestica (d_p)	10 ÷ 700 nm
Radni uvjeti	
Temperatura okolnog zraka	5 °C ÷ 35 °C
Relativna vlažnost zraka	0 ÷ 80 %
Temperatura obrade uzorka	≤ 52 °C
Karakteristike komponenti sustava	
Faktor razrjeđivanja	1:10, 1:100, 1:300
Temperatura cijevi za isparavanje	300 °C ± 3 °C
Protok uzorka	0,07 dm^3/min
Protok zraka	0,02 dm^3/min
Opće karakteristike uređaja	
Masa uređaja	~ 23 kg
Opskrba električnom energijom	90 – 240 V AC, 50/60 Hz
	12 – 24 V DC, do 60 A

3.2.4. Horiba OBS-ONE-PN

Prijenosni analizator *OBS-ONE-PN* proizvođača *Horiba* namijenjen je mjerenju emisije PN u ispušnim plinovima vozila i strojeva kao dio PEMS sustava za analizu ukupnih emisija u realnim uvjetima uporabe (slika 25.). Analizator, prikazan na slici 24., primjenjuje CPC metodu za određivanje broja krutih čestica. Uz to, opremljen je sustavom za dvostupanjsko razrjeđivanje uzorka filtriranim zrakom te katalizatorom hlapljivih čestica. Prvi stupanj razrjeđivanja odvija se na mjestu uzorkovanja kako bi se spriječila kondenzacija vlage i hlapljivih čestica. Zatim pri povišenoj temperaturi u katalizatoru dolazi do oksidacije hlapljivih čestica, nakon čega slijedi drugi stupanj razrjeđivanja. Tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 7.



Slika 24. Prijenosni analizator *Horiba OBS-ONE*-PN koji za određivanje broja krutih čestica primjenjuje CPC metodu [26]



Slika 25. Postavljanje *Horiba PEMS* sustava na stražnji kraj vozila [26]

Tablica 7. Tehničke karakteristike prijenosnog analizatora *Horiba OBS-ONE-PN*

Detekcija krutih čestica		
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	1000 ÷ 50 x 10^6 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
Preciznost koncentracije	± 15 %	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 23 nm	< 60 %
	d_p = 50 nm	> 60 %
Vrijeme odziva instrumenta	$t_{10} - t_{90}$	3 ± 0,5 s
	$t_0 - t_{90}$	8 ± 0,5 s
Protok uzorka		
Protok na ulazu u mjerni instrument	0,7 dm^3/min (nominalni)	
Protok kroz CPC brojač krutih čestica	0,1 dm^3/min (nominalni)	
Protok kroz zaobilazni (*bypass*) vod	0,6 dm^3/min (nominalni)	
Kondenzirajuća tekućina		
Radna tekućina	99,5 %-tni alkohol izopropanol	
Sustav punjenja	punjivi spremnik	
Vrijeme uzorkovanja po punjenju	4 h	
Karakteristike komponenti sustava		
Ukupni faktor razrjeđivanja	1:100	
Radna temperatura katalizatora	350 °C	
Učinkovitost odvajača hlapljivih čestica	> 99,9 % za čestice 30 nm tetrakontana	
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	-10 °C ÷ 40 °C	
Apsolutni tlak zraka	86 kPa ÷ 106 kPa	
Temperatura uzorka	≤ 300 °C	
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	225 x 350 x 470 mm	
Masa uređaja	< 20 kg	
Opskrba električnom energijom	100 ÷ 240 V AC, 50/60 Hz, 100 ÷ 200 W	

3.3. Uređaj za određivanje veličine krutih čestica (*TSI 3090*)

Osim već opisanih metoda i uređaja za mjerenje broja krutih čestica u ispušnim plinovima MSUI, u laboratorijskim ispitivanjima primjenjuju se i analizatori veličine krutih čestica i njihove raspodjele u ovisnosti o veličini. Jedan od takvih uređaja je i uređaj *3090* proizvođača *TSI*, prikazan na slici 26., koji se primjenjuje za kontinuirano mjerenje raspodjele broja krutih čestica ovisno o njihovoj veličini tijekom stacionarnih, dinamičkih ili tranzijentnih ispitivanja. Omogućava uvid u stanje emisija krutih čestica u realnom vremenu analizu utjecaja promjena parametara rada motora poput: brzine vrtnje, okretnog momenta na emisije. Također se omogućava analiza emisija tijekom hladnog pokretanja MSUI i regeneracije DPF-a.

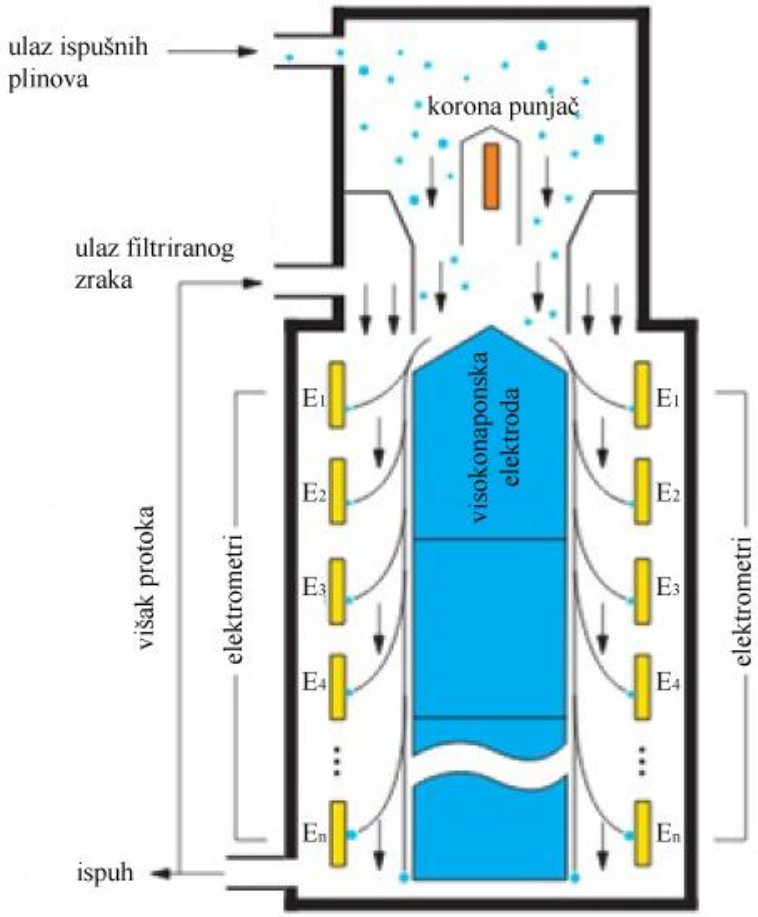


Slika 26. Uređaj za određivanje broja i raspodjele krutih čestica *TSI Model 3090* [27]

3.3.1. Princip rada uređaja

Uređaj, shematski prikazan na slici 27., započinje rad uzorkovanjem ispušnih plinova kroz ulazni ventil. Prolaskom kroz punjač zbog efekta korone dolazi do nabijanja krutih čestica pozitivnim električnim nabojem. Nabijene čestice zatim dolaze u mjerno područje u blizini središta centralno smještene visokonaponske elektrode. Duž elektrode nabijene čestice prenose se prethodno filtriranim zrakom. Induciranjem pozitivnog napona na elektrodi dolazi do premještanja pozitivno nabijenih čestica prema elektrometrima koji su postavljeni po obodu komore. Pri kontaktu čestice prenose svoj naboj na elektrometar. Čestice s većim

promjerom električne mobilnosti dolaze u kontakt s elektrometrima postavljenim pri vrhu, a čestice manjeg promjera električne mobilnosti prenose svoj naboj na elektrometre postavljene na nižem djelu uređaja. Na taj je način pomoću velikog broja visoko-osjetljivih detektora moguće odrediti broj krutih čestica različitih promjera.



Slika 27. Shematski prikaz principa rada uređaja *TSI Model 3090* [27]

3.3.2. Tehničke karakteristike uređaja

Uređaj je pogodan za ispitivanja pri niskim i visokim koncentracijama krutih čestica u ispušnim plinovima čiji je promjer električne mobilnosti od 5,6 do 560 nm uz odziv uređaja od 10 Hz. Ostale tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Tehničke karakteristike uređaja *TSI Model 3090*

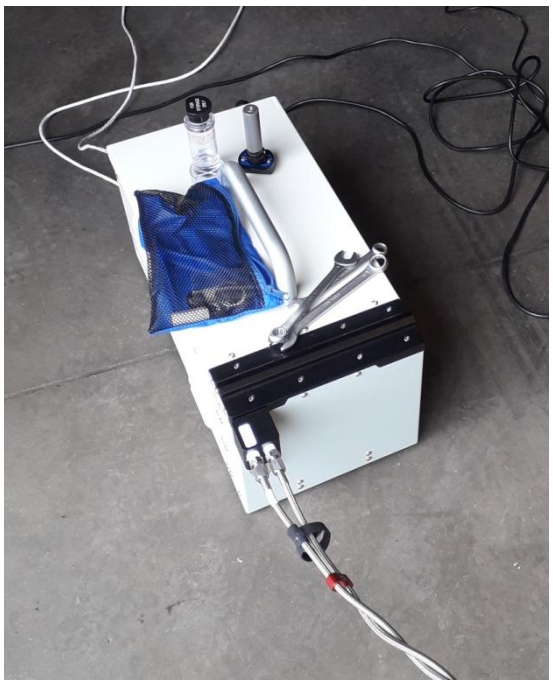
Radne značajke	
Raspon mjerenja čestica	5,6 ÷ 560 nm
Broj kanala elektrometara	22
Način rada punjača	Unipolarni difuzijski punjač
Vremenski odziv	10 Hz
Učinkovitost ciklona	1 μm (50 %)
Radni uvjeti	
Temperatura ulaznog uzorka	10 °C – 52 °C
Radna temperatura	0 °C – 40 °C
Atmosferski tlak	70 – 103 kPa
Relativna vlažnost zraka	0 – 90 %
Protok uzorka	10 dm^3/min
Protok zraka	40 dm^3/min
Opće karakteristike uređaja	
Dimenzije uređaja	704 x 343 x 439 mm
Masa uređaja	32 kg
Opskrba električnom energijom	U = 100 ÷ 240 V AC, 50/60 Hz, P = 250 W

4. OPIS ANALIZATORA *TSI 3795*

TSI 3795 prijenosni je analizator namijenjen mjerenju broja krutih čestica u ispušnim plinovima. Primjena uređaja je široka, poglavito za ispitivanje strojeva opremljenih MSUI s kompresijskim paljenjem poput: građevinskih strojeva, autobusa, generatorskih setova i sl. Ispitivanja uključuju ocjenu sukladnosti strojeva, provjeru rada uređaja za naknadnu obradu ispušnih plinova, provjeru naknadne ugradnje filtra za krute čestice, određivanje emisija vozila i znanstvena istraživanja vezana uz emisije MSUI. Uređaj, prikazan na slikama 28. i 29., se može koristiti za ispitivanja u laboratoriju ili u stvarnim uvjetima rada.



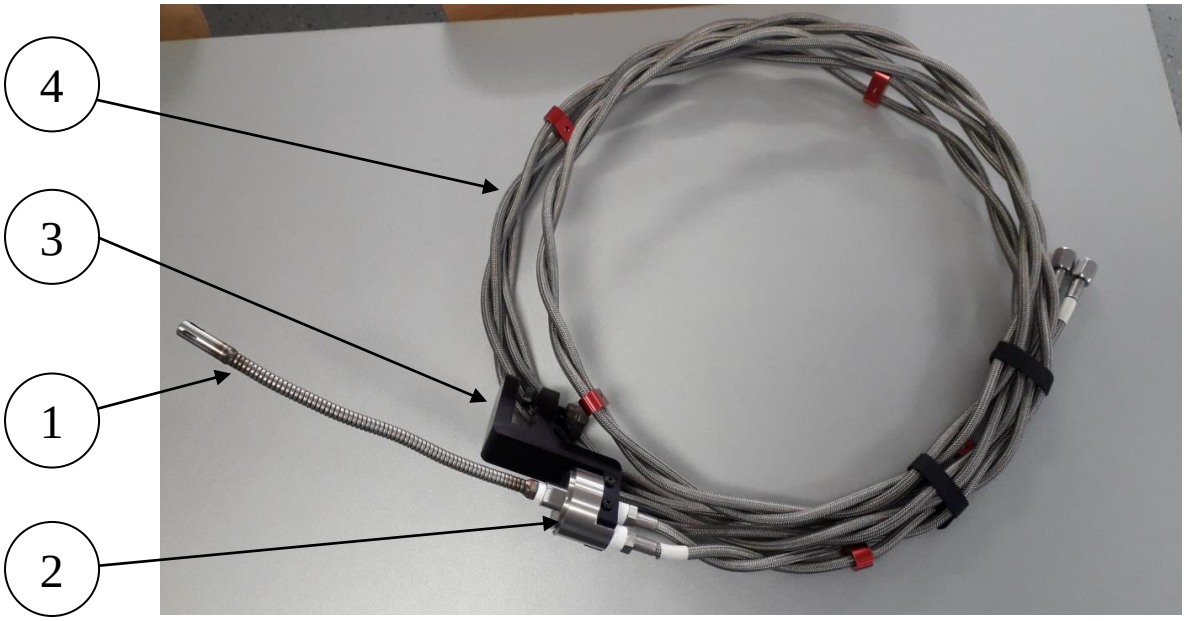
Slika 28. Analizator *TSI 3795* za određivanje broja krutih čestica [28]



Slika 29. Analizator *TSI 3795* u uporabi

4.1. Dijelovi i tehničke karakteristike uređaja

Analizator *TSI 3795* sastoji se od sustava uzorkovanja i prijenosa ispušnih plinova te mjernog instrumenta.

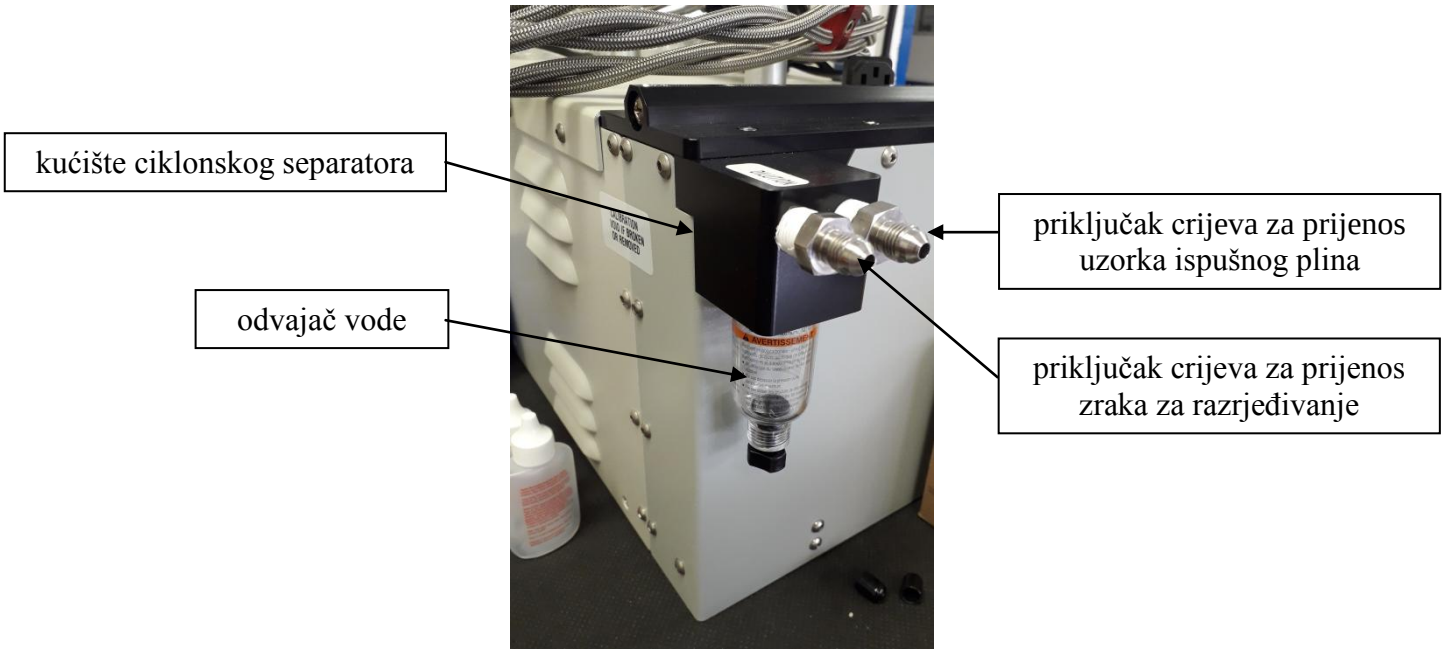


Slika 30. Dijelovi sustava za uzorkovanje analizatora *TSI 3795*

Sustav uzorkovanja, prikazan na slici 30, sastoji se od sljedećih komponenti:

1. Sonda za uzorkovanje,
2. Uređaj za razrjeđivanje,
3. Stega za pričvršćivanje,
4. Crijeva za prijenos zraka i uzorka.

Sustav za uzorkovanje povezuje se s mjernim instrumentom sa stražnje strane uređaja (slika 31.). Sa stražnje strane nalazi se i kućište ciklonskog separatora i odvajač vode. Na prednjoj strani uređaja, prikazanoj na slici 32., nalaze se priključci za komunikaciju s računalom i priključak za napajanje, prekidači za uključivanje uređaja te ventilator za hlađenje. S prednje strane umeće se i spremnik radne tekućine.



Slika 31. Položaj priključaka za sustav uzorkovanja zajedno s kućištem ciklonskog separatora i odvajačem vode na stražnjoj strani uređaja



Slika 32. Stražnja strana uređaja *TSI 3795*

Komunikacija s uređajem ostvaruje se putem mrežnog (*ethernet*) kabla, a za upravljanje koristi se računalo ili tablet korištenjem specijaliziranog softvera.

Tehničke su karakteristike uređaja navedene u tablici 9.

Tablica 9. Tehničke karakteristike analizatora *TSI 3795*

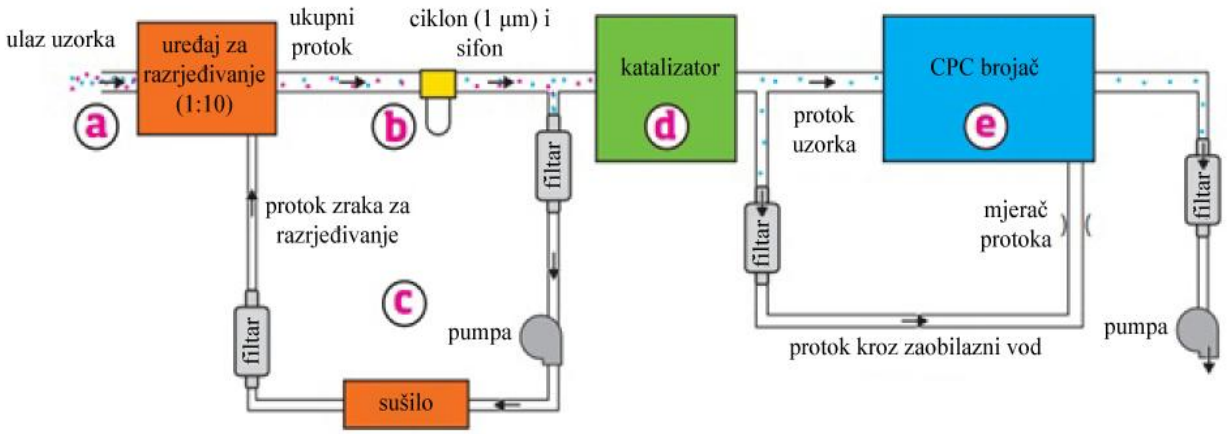
Detekcija krutih čestica		
Metoda mjerenja	kondenzacijsko brojanje čestica (CPC)	
Raspon mjerenja	1000 – 5 x 10^6 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
Preciznost koncentracije	± 10 %	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 23 nm	< 50 %
	d_p = 41 nm	> 50 %
Vrijeme odziva instrumenta	$t_{10} - t_{90}$	< 5 s
	$t_0 - t_{90}$	< 10 s
Protok uzorka		
Protok na ulazu u mjerni instrument	0,7 dm^3/min (nominalni)	
Protok kroz CPC brojač krutih čestica	0,1 dm^3/min (nominalni)	
Protok kroz zaobilazni (*bypass*) vod	0,6 dm^3/min (nominalni)	
Kondenzirajuća tekućina		
Radna tekućina	99,5 %-tni alkohol izopropanol	
Sustav punjenja	punjivi spremnik	
Vrijeme uzorkovanja s jednim punjenjem	4 h	
Katalizator		
Radna temperatura	350 °C	
Učinkovitost odvajača hlapljivih čestica	> 99 % za čestice 30 nm tetrakontana	
Radni uvjeti		
Temperatura okolnog zraka	-10 °C ÷ 40 °C	
Apsolutni tlak	70 kPa ÷ 106 kPa	
Komunikacija		
Komunikacija s računalom	*Ethernet*	
Upravljački program	*TSI Nanoparticle Emissions Tester Software*	
Odziv uređaja	Način mjerenja prema SR 941.242	10 Hz
	Opći način mjerenja	1 Hz
Opće karakteristike uređaja		
Dimenzije uređaja	260 x 330 x 570 mm	
Masa uređaja	13,1 kg	
Opskrba električnom energijom	100 ÷ 240 V AC, 50/60 Hz, 100 ÷ 200 W	

4.2. Princip rada

Analizator *TSI 3795* u radu primjenjuje CPC metodu za određivanje broja krutih čestica. Uzorak ispušnih plinova prikuplja se izravno iz cijevi ispušnog sustava. Unutar uređaja obavlja se razrjeđivanje uzorka i pretkondicioniranje kao priprema za mjerenje broja krutih čestica. Na slici 33. shematski je prikazan princip rada uređaja s označenim osnovnim dijelovima.

Mjerni instrument uređaja u sebi sadrži:

1. ciklonski separator s odvajačem vode – uređaj za pretkondicioniranje;
2. katalizator – odvajač hlapljivih čestica;
3. CPC brojač – mjerni senzor s pripadajućom elektronikom;
4. napajanje;
5. pumpe i druge mehaničke sustave podrške;
6. termoregulacijski sustav koji uključuje ventilatore i izmjenjivače topline.



Slika 33. Shematski prikaz rada analizatora *TSI 3795* [29]

a) Sonda za uzorkovanje prikuplja uzorak ispušnih plinova izravno iz cijevi ispuha. Na kraju sonde integriran je uređaj za razrjeđivanje kroz koji prolazi ukupni protok uzorka te se u tom trenutku razrjeđuje.

b) Razrijeđeni uzorak ispušnih plinova ulazi u ciklonski separator i odvajač vode. Ciklonski separator uklanja krupne čestice (d_p > 1 μm) iz uzorka, a odvajač vode treba isto učiniti s vodenim kondenzatom.

c) Dio protoka uzorka ispušnog plina usmjerava se pomoću pumpe u recirkulacijski vod u kojem se nalaze dva HEPA filtra i silikagel-sušilo. Prolaskom kroz sušilo i filtre pročišćuje se navedeni dio uzorka koji se zatim koristi kao sredstvo za razrjeđivanje glavnog protoka.

d) Razrijeđeni uzorak nakon prolaska kroz ciklon i odvajač vode ulazi u katalizator u kojem se odvajaju hlapljive čestice. Ugrijan je na temperaturu od T = 350 °C pri kojoj isparuju i oksidiru hlapljive čestice iz uzorka.

e) U brojaču krutih čestica CPC metodom određuje se broj preostalih krutih čestica u uzorku pri čemu se kao radna tekućina koristi alkohol izopropanol. Dio protoka uzorka prolazi kroz zaobilazni (*bypass*) vod koji služi za produljenje vremena prijenosa uzorka do brojača.

4.3. Usporedba tehničkih karakteristika analizatora

Tehničke karakteristike analizatora *TSI 3795* uspoređene su s ranije opisanim analizatorima broja krutih čestica u kategorijama u kojima su poznati i dostupni tehnički podatci za većinu uređaja. Paralelna usporedba prikazana je u tabličnom obliku kao što je vidljivo u tablici 10.

Tablica 10. Usporedni prikaz tehničkih podataka analizatora za određivanje broja krutih čestica u ispušnim plinovima

Uređaj	***AVL APC^{plus}***		***Grimm 5431***		***Horiba MEXA2200 SPCS***		***Airmodus A23***		***AVL M.O.V.E PN PEMS iS***	***Testo NanoMet3***	***Horiba OBS-ONE-PN***		***TSI 3795***	
Vrsta uređaja	Stacionarni		Stacionarni		Stacionarni		Prijenosni		Prijenosni	Prijenosni	Prijenosni		Prijenosni	
Metoda mjerenja	CPC		CPC		CPC		CPC		DC	DC	CPC		CPC	
Raspon mjerenja	0 ÷ 30 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica) - nakon razrjeđivanja		0 ÷ 23 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica) - nakon razrjeđivanja		0 ÷ 50 000 cm^{-3} – nakon razrjeđivanja		0 ÷ 30 000 cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica) – nakon razrjeđivanja do 100 000 cm^{-3} (ukupni intenzitet svjetlosti) – nakon razrjeđivanja		do 2 x 10^{7} cm^{-3}	1000 ÷ 10^{6} cm^{-3} (ispušni plinovi izravno iz ispuha) 10^{4} – 10^{8} cm^{-3} (s prethodnim razrjeđivanjem)	1000 ÷ 50 x 10^{6} cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)		1000 ÷ 5 x 10^{6} cm^{-3} (brojanje pojedinačnih čestica)	
Učinkovitost mjerenja	d_p = 10 nm	> 50 %	d_p = 23 nm	50 ± 12 %	d_p = 23 nm	50 ± 12 %	d_p = 23 nm	50 ± 12 %	-	-	d_p = 23 nm	< 60 %	d_p = 23 nm	< 50 %
	d_p = 15 nm	> 90 %	d_p = 41 nm	≥ 90 %	d_p = 41 nm	≥ 90 %	d_p = 41 nm	≥ 90 %			d_p = 41 nm	> 60 %	d_p = 41 nm	> 50 %
Linearnost koncentracije	do 50 000 cm^{-3} (R^2 > 0,95)		1 – 23 000 cm^{-3} (R^2 ≥ 0,98)		do 50 000 cm^{-3} (R^2 > 0,95)		-		-	-	-		do 5 x 10^{6} cm^{-3} (R^2 > 0,9997)	
Vrijeme odziva instrumenta (t_{10} – t_{90})	4,5 s		< 3 s		-		< 5 s		-	-	3 ± 0,5 s		< 5 s	
Protok uzorka	5 dm^{3}/min (razrijeđeni)		0,6 dm^{3}/min		-		1 dm^{3}/min		0,5 dm^{3}/min	0,07 dm^{3}/min (nominalni)	0,7 dm^{3}/min (nominalni)		0,7 dm^{3}/min (nominalni)	
	4 – 7 dm^{3}/min (nerazrijeđeni)													
Faktor razrjeđivanja	Ukupni: 1:100 – 1:1000		-		PND_1: 1:10 - 1:200;		-		1:10 (konstantan)	Ukupni: 1:10, 1:100, 1:300	Ukupni: 1:100		1:10	
	PND_1: 1:10 - 1:1000				PND_2 : 1:15									
	PND_2 : 1:10													
Masa uređaja	~ 55 kg		8,9 kg		~ 140 kg		10,5 kg		~ 16 kg	~ 23 kg	< 20 kg		13,1 kg	

5. UPORABA ANALIZATORA *TSI 3795*

5.1. Postavljanje uređaja

Budući da je *TSI 3795* visoko-precizan instrument koji se koristi za utvrđivanja sukladnosti i certifikacijska mjerenja, prije njegova korištenja u postupcima ispitivanja potrebno je provesti postupke postavljanja uređaja, ugradnje i instalacije svih komponenti uređaja na propisan način.

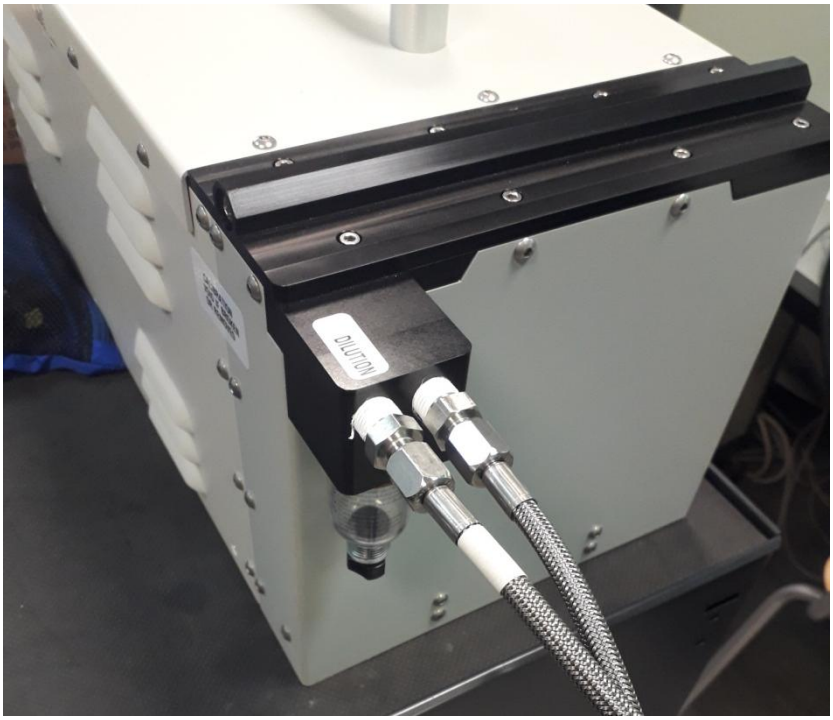
Prije ugradnje opreme potrebno je osigurati prostor širine 520 mm, visine 260 mm i duljine 255 mm za smještaj uređaja.

Proces postavljanja uređaja (pripreme za mjerenje) sastoji se od sljedećih postupaka:

1. Ugradnja sustava za uzorkovanje na mjerni uređaj,
2. Punjenje spremnika alkoholom,
3. Povezivanje uređaja s računalom,
4. Uključivanje uređaja.

5.1.1. Ugradnja sustava za uzorkovanje

Sustav za uzorkovanje pričvršćuje se na analizator pomoću navojne (cijevne) spojnice na način da se slobodni krajevi crijeva za prijenos uzorka ispušnog plina i crijeva za prijenos zraka za razrjeđivanje pričvrste na odgovarajuće priključke na uređaju. Priključci za crijeva nalaze se iznad ciklonskog separatora (slika 34.) sa stražnje strane uređaja.



Slika 34. Stražnja strana analizatora s priključenim crijevima za prijenos uzorka ispušnih plinova i zraka za razrjeđivanje

5.1.2. Punjenje spremnika alkoholom

Nakon ugradnje sustava za uzorkovanje potrebno je napuniti spremnik radnom tekućinom uređaja – alkoholom izopropilenom. Punjenje spremnika obavlja se tijekom mirovanja uređaja prije svakog ispitivanja te nakon potrošnje radne tekućine, u slučaju kontinuiranog ispitivanja duljeg od četiri sata.



Slika 35. Staklena kapsula za punjenje spremnika radne tekućine

Za punjenje spremnika koristi se staklena kapsula s čepom prikazana na slici 35. Radna tekućina ulijeva se u kapsulu, a zatim se spremnik uranja u kapsulu (slika 36.). Porozni materijal unutar spremnika apsorbira radnu tekućinu iz kapsule te se spremnik na posljetku umeće s prednje strane uređaja, kao što je prikazano na slici 32.



Slika 36. Spremnik radne tekućine uronjen u radnu tekućinu unutar staklene kapsule za punjenje

5.1.3. Povezivanje uređaja s računalom

Za upravljanje uređajem koristi se računalo ili tablet, a veza između upravljačke jedinice i uređaja postiže se povezivanjem mrežnim (*ethernet*) kablom. Jedan kraj mrežnog (*ethernet*) kabla priključuje se na predviđeno mjesto s prednje strane uređaja, dok se drugi kraj na isti način priključuje u računalo.

5.2. Načini provedbe mjerenja

Dva su osnovna načina provedbe mjerenja koja je uređaj u mogućnosti primjenjivati:

1. Kontrolni način mjerenja prema pravilniku SR 941.242[4];
2. Opći način mjerenja.

5.2.1. Kontrolni način mjerenja prema pravilniku SR 941.242

Način kontrolnog mjerenja sukladan je švicarskom pravilniku SR 941.242 za periodično ispitivanje strojeva pogonjenih Dieselovim motorom opremljenim DPF-om. Pravilnik SR 941.242 propisuje obvezno ispitivanje svih necestovnih pokretnih strojeva (NCPS) u intervalu od svake dvije godine kako bi se osiguralo da filtri čestica ugrađeni u strojeve ispravno rade tijekom cijelog radnog vijeka stroja. Analizator *TSI 3795* certificiran je od strane Švicarskog federalnog instituta za mjeriteljstvo (METAS) za obavljanje ispitivanja NCPS prema protokolu koji propisuje pravilnik SR 941.242.

5.2.1.1. Granična vrijednost emisije

Prema pravilniku SR 941.242 granična vrijednost ukupnog prosječnog broja krutih čestica koju NCPS moraju zadovoljiti iznosi 250 000 cm^{-3}. Navedena vrijednost proizlazi iz pravilnika SR 814.318.142.1[5] koja propisuje graničnu vrijednost emisije krutih čestica od 1 x 10^{12} 1/kWh u ispušnim plinovima MSUI s kompresijskim paljenjem za pojedine skupine motora. Tako definirana granična vrijednost emisije u skladu je i s graničnim vrijednostima definiranim od strane Programa mjerenja čestica Ekonomske komisije UN-a za Europu (UNECE PMP) te Uredbe (EU) 2016/1628 Europskog parlamenta i vijeća.

Budući da se vrijednost emisije PN izražena mjernom jedinicom 1/kWh može odrediti isključivo uz poznavanje trenutne snage koju MSUI ostvaruje, što nije moguće utvrditi bez ispitivanja na ispitnom stolu, za potrebe periodičkog ispitivanja strojeva i ispravnosti opreme za naknadnu obradu ispušnih plinova uvedena je usporedbena vrijednost od 250 000 cm^{-3}. Usporedbena vrijednost određena je teorijskom konverzijom granične vrijednosti, a izvodi se prema [32] iz izraza:

$$PN_{\mathrm{LRV}} = PN_{\mathrm{VAMV}} \cdot \frac{\rho_{\mathrm{isp_pl}}}{b_{\mathrm{e}} \cdot (\lambda \cdot L_{\mathrm{t}} + 1)} \qquad \textbf{(1)}$$

[4] Pravilnik Federalnog ministarstva pravosuđa i policije o opremi za mjerenje ispušnih plinova za motore s unutarnjim izgaranjem – njem. *Verordnung des EJDP über Abgasmessmittel für Verbrennugsmotoren* (VAMV);
[5] Pravilnik Švicarskog federalnog vijeća o kontroli onečišćenja zraka – njem. *Luftreinhalte-Verordnung der Schweizerische Bundesrat* (LRV)

gdje su veličine definirane u tablici 11.

Tablica 11. Vrijednosti potrebne za teorijsku konverziju granične vrijednosti emisije PN prema [32]

PN_{LRV}	[m^{-3}]	vrijednost koncentracije PN u ispušnim plinovima prema pravilniku SR 941.242, u ovisnosti o volumenu ispušnih plinova u standardnim uvjetima atmosfere (T_0 = 0 °C, p_0 = 1013 mbar) uz 5 % udjela O_2
PN_{VAMV}	[1/kWh]	vrijednost koncentracije PN u ispušnim plinovima u ovisnosti o efektivnom radu MSUI
$\rho_{\mathrm{isp_pl}}$	[kg/m^3]	pretpostavljena gustoća ispušnih plinova MSUI u standardnim uvjetima; za MSUI s kompresijskim paljenjem: $\rho_{\mathrm{isp_pl}} = 1{,}2934$ kg/m^3
b_{e}	[g/kWh]	specifična efektivna potrošnja goriva; za MSUI s kompresijskim paljenjem: $b_e = 215$ g/kWh
λ	-	faktor pretička zraka; za MSUI s kompresijskim paljenjem: $\lambda = 1{,}8$
L_{t}	[kg_Z/kg_G]	stehiometrijska masa zraka za izgaranje 1 kg goriva; za dizelsko gorivo: $L_t = 14{,}5$ kg_Z/kg_G

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablice 11. i granične vrijednosti PN_{VAMV} = 1 x 10^{12} 1/kWh u izraz (1) izračunava se vrijednost PN_{LRV} = 221 968 cm^{-3} na osnovu koje je određena usporedbena vrijednost od 250 000 cm^{-3}.

5.2.1.2. Protokol kontrolnog mjerenja

Kontrolno mjerenje podijeljeno je u nekoliko faza nakon kojih se na osnovu rezultata mjerenja određuje zadovoljava li stroj zakonski uvjet o broju krutih čestica u ispušnim plinovima.

Pravilnikom je prije provođenja ispitivanja propisano kondicioniranje motora i analizatora. Kondicioniranje se provodi slobodnim ubrzavanjem motora od 4 do 6 puta kako bi se postigla propisana radna temperatura rashladne tekućine i ulja u motoru. Nakon kondicioniranja potrebno je unutar vremenskog perioda od najviše jedne minute započeti s ispitivanjem.

Ispitivanje se provodi pri konstantnoj najvećoj brzini vrtnje motora bez opterećenja. U slučaju da iz nekog razloga takav način ispitivanja nije moguć, dozvoljeno je ispitivanje provoditi i pri konstantnoj brzini vrtnje nižoj od najveće, ali višoj od brzine praznog hoda, uz uvjet ponovljivosti ispitivanja. Ispitivanje je dozvoljeno provoditi i u radnim točkama s opterećenjem motora, ali i u tom slučaju potrebno je osigurati ponovljivost.

Ukupno vrijeme trajanja ispitivanja iznosi 40 sekundi, a uključuje sljedeće faze:

- Zagrijavanje uređaja – prikupljaju se podatci o emisijama, no oni se ne koriste za ispitivanje (t_{zagr} = 15 s);
- Prvo mjerenje – prvo razdoblje mjerenja PN iz kojeg se izračunava prva prosječna vrijednost (t_{m1} = 5 s);
- Prvo razdoblje mirovanja – prikupljaju se podatci o emisijama, no oni se ne koriste za ispitivanje (t_{i1} = 5 s);
- Drugo mjerenje – drugo razdoblje mjerenja PN iz kojeg se izračunava druga prosječna vrijednost (t_{m2} = 5 s);
- Drugo razdoblje mirovanja – prikupljaju se podatci o emisijama, no oni se ne koriste za ispitivanje (t_{i2} = 5 s);
- Treće mjerenje – treće razdoblje mjerenja PN iz kojeg se izračunava treća prosječna vrijednost (t_{m3} = 5 s).

Po završetku ispitivanja iz izračunatih prosječnih vrijednosti PN izračunava se ukupna prosječna vrijednost temeljem koje se ocjenjuje zadovoljava li stroj pravilnikom propisani uvjet.

Iz rezultata ispitivanja izrađuje se službeno izvješće koje sadrži podatke o mjernom uređaju i ispitnom tijelu te sljedeće podatke o provedenom ispitivanju:

1. Datum i vrijeme ispitivanja;
2. Vremensko trajanje ispitivanja;
3. Identifikaciju operatera (mjeritelja);
4. Podatci o ispitivanom stroju – proizvođač, model, identifikacijski broj stroja i motora;
5. Prosječne vrijednosti PN za sva tri mjerenja;
6. Ukupna prosječna vrijednost PN;
7. Granična vrijednost PN;
8. Ishod ispitivanja;

9. Podatci o atmosferskim uvjetima – temperatura (°C), tlak (kPa) i relativna vlažnost zraka (%).

Primjer službenog izvješća o ispitivanju prikazan je na slici 37.

2/25/2015 2:43:34 PM

Model:	3795	**Manufacturer:**	TSI Inc.
Serial:	3795143001	**Last Calibration:**	2015-01-26
Firmware Version:	1.02	**Application Version:**	1.1.0.0
Application Key:	C2AD-EAE5-8BB0-3989-E79F-7264-4162-0B19		

TSI GmbH
Neuköllner Strasse 4
52068 Aachen
+49 241-52303-0

OFFICIAL MEASUREMENT

Date/Time:	2015-02-25, 14:42:53	**Mean #1 (1/cm³):**	1.38E5
Duration:	00:00:40	**Mean #2 (1/cm³):**	1.17E5
Operator:	JPJ	**Mean #3 (1/cm³):**	1.20E5
Machine Make:	TSI	**Overall Mean (1/cm³):**	1.25E5
Machine Model:	625	**Limit (1/cm³):**	2.5E5
Machine Id:	320AC41522	**Result:**	**PASS**
Engine Id:	116CG59		

Ambient Conditions: *22.0 °C, 101.0 kPa, 37 %RH*

SIGNATURE:

Slika 37. Izgled izvješća o provedenom ispitivanju u kontrolnom načinu mjerenja [31]

5.2.2. Opći način mjerenja

Opći način mjerenja služi za kontinuirano mjerenje PN u zadanom vremenskom intervalu. U tu svrhu omogućena je izmjena vremenskih parametara prema potrebama ispitivanja s tek jednim ograničenjem u vidu najduljeg trajanja ispitivanja od 8 sati. Na taj način moguće je izraditi vlastiti protokol s proizvoljnim trajanjem i prekidima mjerenja.

Tijekom provođenja ispitivanja u općem načinu mjerenja omogućen je pregled trenutnih vrijednosti PN u ispušnim plinovima očitavanjem s dijagrama koji se iscrtava na zaslonu računala u realnom vremenu s razlučivošću od jedne sekunde. Osim dijagrama s vrijednostima PN u ovisnosti o vremenu, tijekom ispitivanja dostupni su i sljedeći podatci:

1. Broj mjerenja;
2. Vrijeme početka mjerenja;
3. Atmosferski uvjeti – temperatura (°C), tlak (kPa) i relativna vlažnost zraka (%);
4. Trenutna vrijednost PN;
5. Najveća, najmanja i srednja vrijednost PN tijekom ispitivanja;
6. Standardna devijacija i koeficijent varijance (%).

Navedeni podatci o cijelom trajanju ispitivanja dostupni su po završetku ispitivanja zajedno s cjelovitim dijagramom promjene vrijednosti PN u vremenu. Izmjerene podatke moguće je pohraniti u računalu u znakovnu datoteku (txt format).

5.3. Upravljanje uređajem

Upravljanje funkcijama uređaja u radu obavlja se na računalu pomoću specijaliziranog programskog alata. Alat služi za pripremu ispitivanja, kontrolu parametara uređaja, analizu ispitnih rezultata tijekom i po završetku ispitivanja te izradu krajnjih rezultata i izvješća. Cjelokupno upravljanje provodi se naredbama preko grafičkog (korisničkog) sučelja.

5.3.1. Glavno sučelje

Pokretanjem programa *TSI Nanoparticle Emission Tester* na ekranu računala prikazuje se glavno upravljačko sučelje, prikazano na slici 38. Glavno sučelje služi za odabir sučelja i izbornika vezanih uz provođenje ispitivanja, prilagodbu postavki uređaja i ispitivanja te organizaciju i pohranu rezultata.



Slika 38. Izgled glavnog upravljačkog sučelja

Glavno sučelje sastoji se od sljedećih elemenata:

1. Statusna traka;
2. Ikona za odabir mjerenja u kontrolnom načinu rada (prema pravilniku SR 941.242);
3. Ikona za odabir mjerenja u općem načinu rada;

4. Ikona za odabir postavki;
5. Ikona za odabir dijagnostičkog sučelja;
6. Ikona za odabir mape provedenih mjerenja u kontrolnom načinu rada;
7. Ikona za odabir mape provedenih mjerenja u općem načinu rada.

5.3.2. Statusna traka

Statusna traka prikazuje se na gornjem dijelu glavnog sučelja. Na statusnoj traci prikazuje se datum i trenutno vrijeme. Boja statusne trake označava ispravan ili neispravan rad uređaja. Plava boja statusne trake znak je ispravnog rada uređaja, a crvena označava neispravan rad. U slučaju neispravnog rada pojavljuje se i simbol pogreške, kao što je vidljivo na slici 39.



Slika 39. Izgled statusne trake u slučaju pojave pogreške [31]

5.3.3. Dijagnostičko sučelje

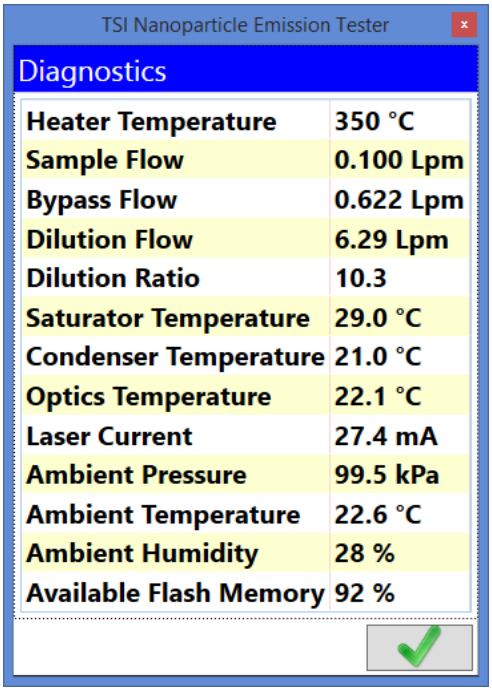
U dijagnostičko sučelje ulazi se izravno iz glavnog sučelja pritiskom na odgovarajuću ikonu (označenu brojem 5). Izgled dijagnostičkog sučelja prikazan je slikom 40.

Na dijagnostičkom sučelju prikazuju se sljedeći podatci:

1. Temperatura grijača (*Heater Temperature*) – temperatura stijenke grijača za oksidaciju hlapljivih čestica (°C);
2. Protok uzorka (*Sample Flow*) – iznos protoka uzorka na mjestu detektora unutar brojača (dm^3/min);
3. Zaobilazni protok (*Bypass Flow*) – iznos protoka kroz zaobilazni vod (dm^3/min);
4. Protok zraka za razrjeđivanje (*Dilution Flow*) – iznos protoka zraka za razrjeđivanje (dm^3/min);
5. Faktor razrjeđenja (*Dilution Ratio*) – iznos ukupnog faktora razrjeđenja u sondi za uzorkovanje;
6. Temperatura uređaja za ovlaživanje (*Saturator Temperature*) (°C);
7. Temperatura kondenzatora (*Condenser Temperature*) (°C);

8. Temperatura optičkog sustava (*Optics Temperature*) (°C);
9. Električna struja lasera (*Laser Current*) – iznos jakosti električne struje lasera (mA);
10. Okolišni uvjeti (*Ambient Temperature, Ambient Pressure, Ambient Humidity*) – temperatura (°C), tlak (kPa) i relativna vlažnost zraka (%);
11. Raspoloživa memorija uređaja (*Available Flash Memory*) (%).

Dijagnostičko sučelje uređaja osvježava se svake dvije sekunde.

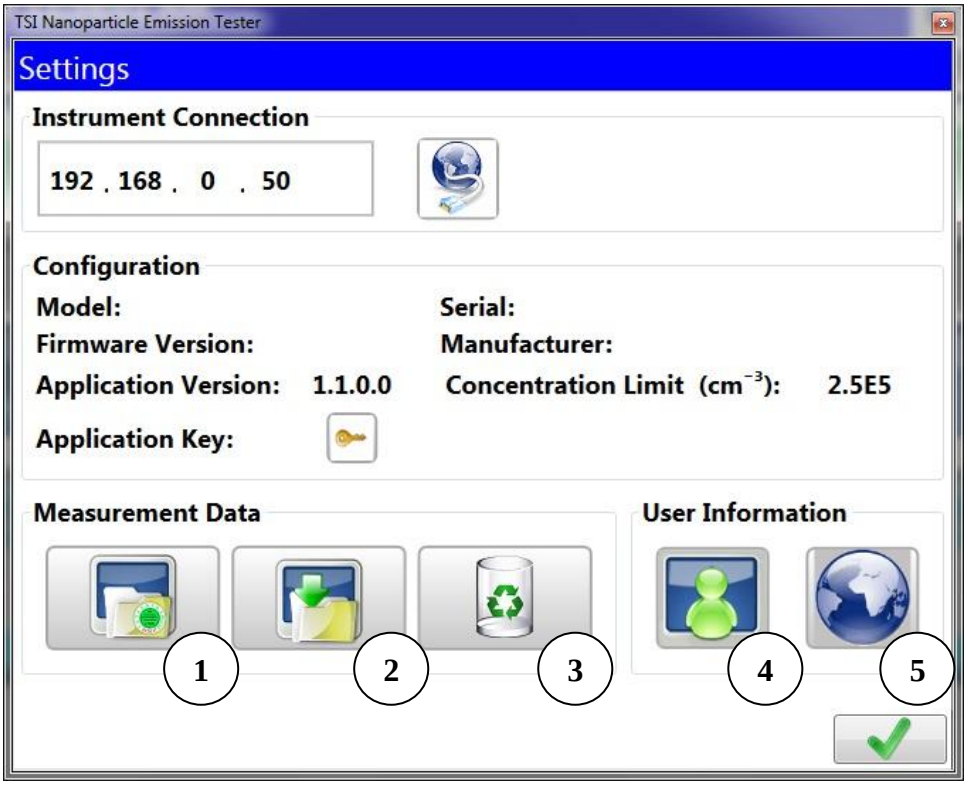


Slika 40. Izgled dijagnostičkog sučelja uređaja [31]

5.3.4. Postavke

U sučelje postavki (slika 41.) također se ulazi izravno iz glavnog sučelja. U sučelju postavki prikazani su sljedeći podatci:

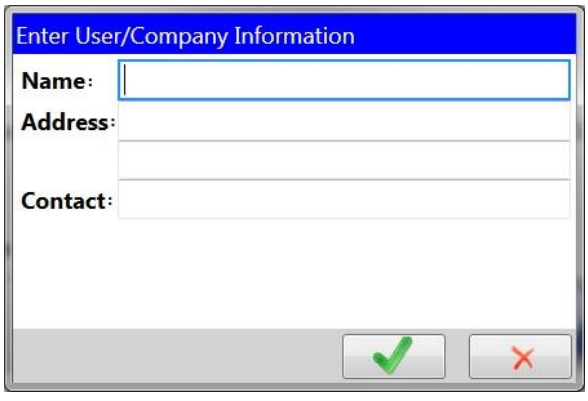
- Podatci o povezivanju uređaja s računalom (*Instrument Connection*) – prozor za unos IP adrese računala i ikona za povezivanje s računalom;
- Konfiguracija uređaja (*Configuration*) – broj modela, broj serije, naziv proizvođača, broj *firmware* verzije i verzije aplikacije, zakonska granična vrijednost PN prema SR 941.242 i identifikacijski broj računala;
- Opcije postavki podataka mjerenja (*Measurement Data*);
- Opcije korisničkih postavki (*User Information*).



Slika 41. Izgled sučelja postavki uređaja

Unutar postavki podataka mjerenja omogućeno je uređivati lokaciju mape kontrolnih mjerenja (1), preuzimanje rezultata općih mjerenja na računalo (2) te brisanje svih zapisanih podataka iz uređaja (3). Navedene radnje obavljaju se odabirom odgovarajućih ikona u sučelju.

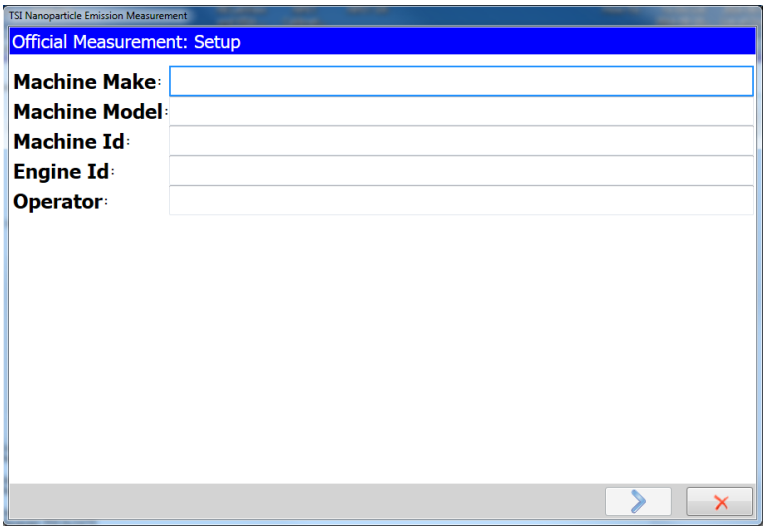
Osim postavki podataka mjerenja omogućeno je uređivanje podataka o korisniku unutar sučelja koje je prikazano na slici 42. Podatci se odnose na identifikaciju operatera, adresu i kontaktne informacije. Sučelje se otvara pritiskom na tipku (4) na sučelju postavki. Moguć je i odabir jezika aplikacije iz izbornika koji se otvara pritiskom na tipku (5).



Slika 42. Izgled sučelja za unos podataka o operateru

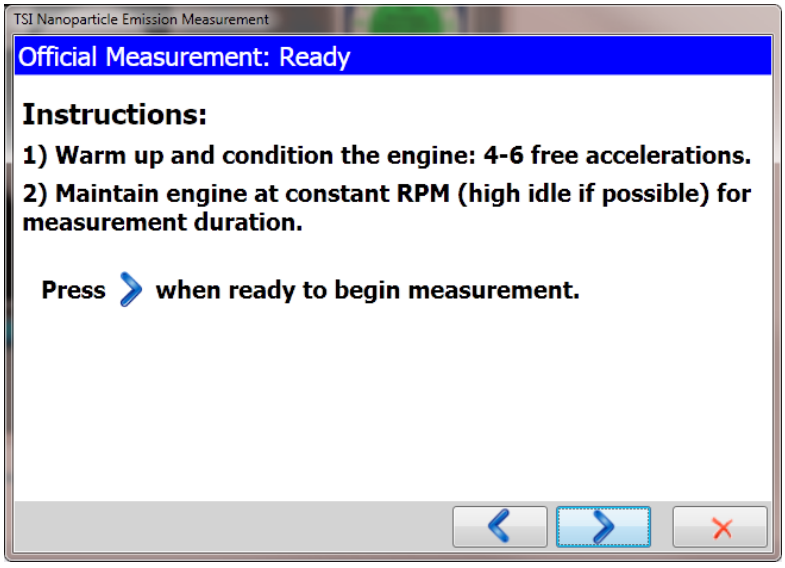
5.3.5. Mjerenje u kontrolnom načinu rada

Pritiskom na odgovarajuću ikonu u glavnom sučelju otvara se sučelje za pripremu mjerenja prikazano na slici 43. U sučelje se na odgovarajuća mjesta unose podatci o stroju, motoru i operateru koji su nužni za identifikaciju.



Slika 43. Izgled sučelja za pripremu mjerenja u kontrolnom načinu

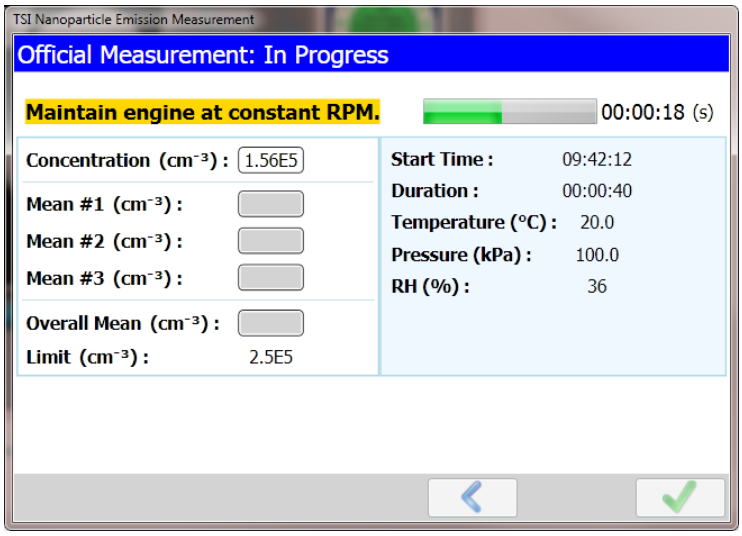
Nakon unosa i potvrde podataka otvara se novi prozor s uputama za kondicioniranje motora prije ispitivanja (slika 44.). Po završetku i potvrdi pripreme i kondicioniranja započinje ispitivanje i otvara se sučelje kontrolnog mjerenja (slika 45.).



Slika 44. Izgled sučelja s uputama za kondicioniranje motora i uređaja [31]

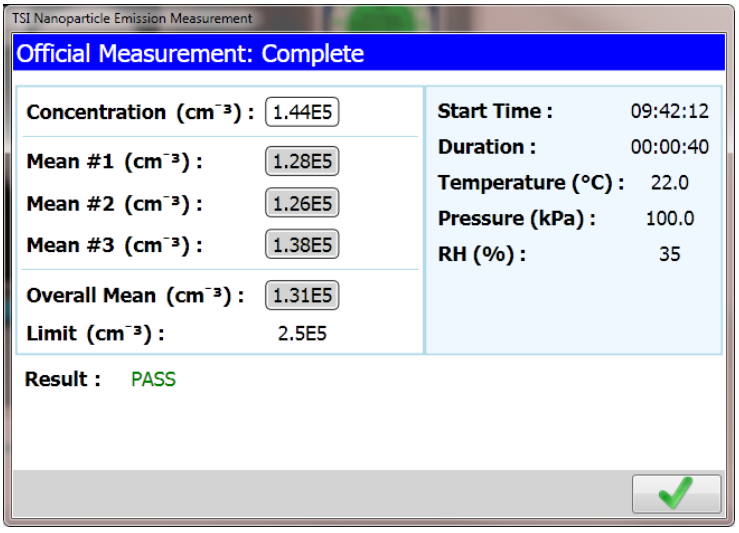
Unutar sučelja kontrolnog mjerenja prikazuju se sljedeći podatci:

- podatci vremenskom trajanju mjerenja – vrijeme početka mjerenja, ukupno trajanje mjerenja, trenutno proteklo vrijeme,
- podatci o atmosferskim uvjetima – temperatura (°C), apsolutni tlak (kPa) i relativna vlažnost zraka (%),
- podatci o izmjerenim vrijednostima – trenutna izmjerena vrijednost PN, prosječne vrijednosti pojedinih mjerenja i ukupna prosječna vrijednost te granična vrijednost PN.



Slika 45. Izgled sučelja kontrolnog mjerenja [31]

Na kraju ispitivanja pojavljuje se sučelje s konačnim rezultatima mjerenja prikazano na slici 46.

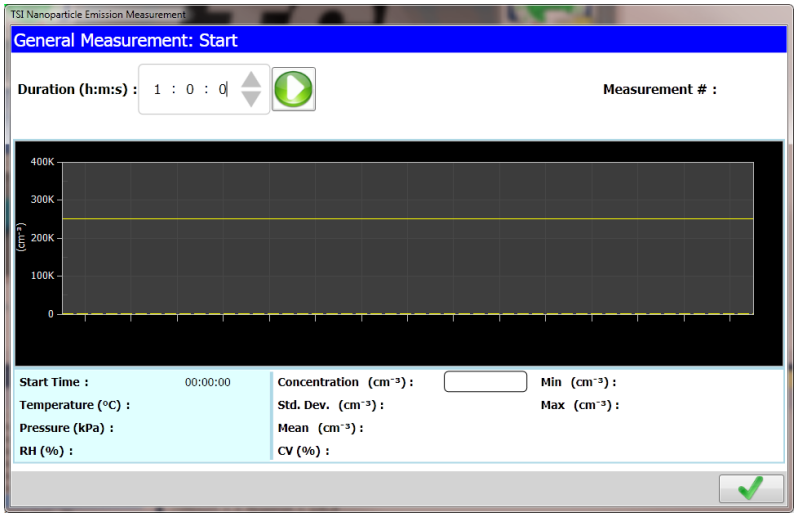


Slika 46. Izgled sučelja konačnih rezultata u kontrolnom načinu mjerenja [31]

5.3.6. Mjerenje u općem načinu rada

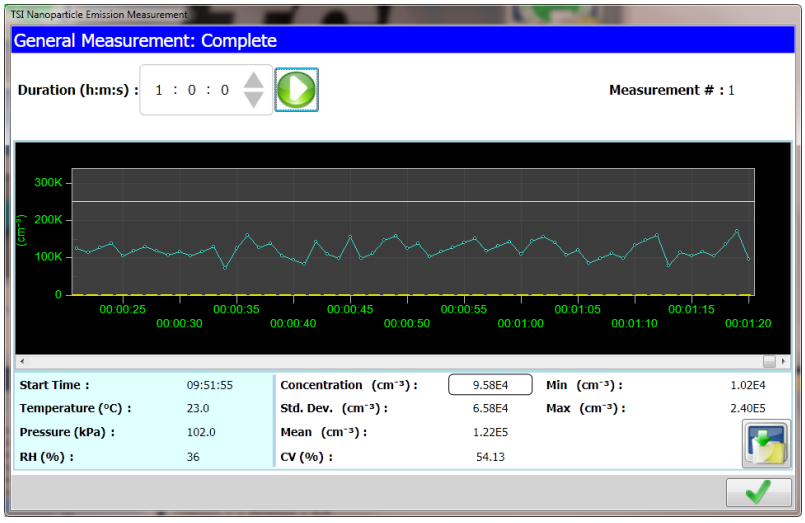
U sučelje općeg načina mjerenja ulazi se izravno iz glavnog sučelja pritiskom na odgovarajuću ikonu. Sučelje općeg načina mjerenja, prikazano na slici 47., sadrži:

- prozor za određivanje trajanja mjerenja,
- ikonu za početak i prekid mjerenja,
- zaslon s dijagramom trenutnih emisija PN,
- opće podatke o mjerenju – vrijeme početka mjerenja, temperatura (°C), apsolutni tlak (kPa) i relativna vlažnost zraka (%),
- podatke o izmjerenim vrijednostima.



Slika 47. Izgled sučelja općeg načina mjerenja prije početka [31]

Po završetku mjerenja u sučelju općeg načina prikazani su izmjereni podatci (slika 48.).



Slika 48. Izgled sučelja općeg načina mjerenja po završetku [31]

6. INICIJALNA MJERENJA

Nakon postavljanja i osposobljavanja uređaja za rad proveden je niz inicijalnih mjerenja kako bi se utvrdile mogućnosti uređaja u radu i probno ispitao sam uređaj.

Ispitivanja su provedena u stacionarnim uvjetima, a mjerene su koncentracije PN u ispušnim plinovima vozila s MSUI s vanjskim izvorom paljenja i direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindar (engl. *Gasoline Direct Injection*) te eksperimentalnog MSUI s kompresijskim paljenjem priključenog na hidrauličku kočnicu u laboratoriju.



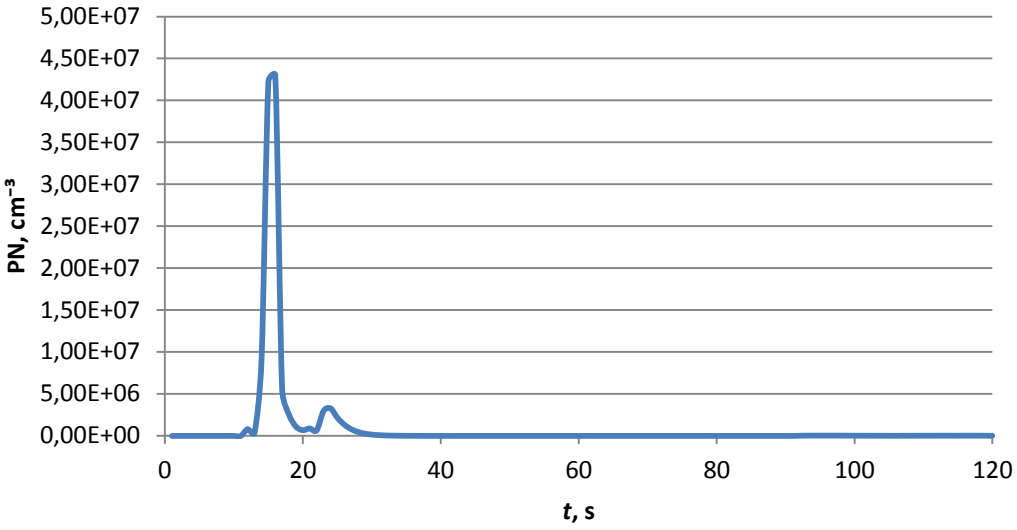
Slika 49. Postavljanje mjerne opreme za inicijalna mjerenja na vozilu s GDI motorom

Pri provođenju mjerenja korišten je opći režim rada analizatora *TSI 3795*, a mjerenja su provedena u različitim radnim točkama motora:

1. S promjenjivom brzinom vrtnje motora;
2. Pri konstantnoj brzini vrtnje motora.

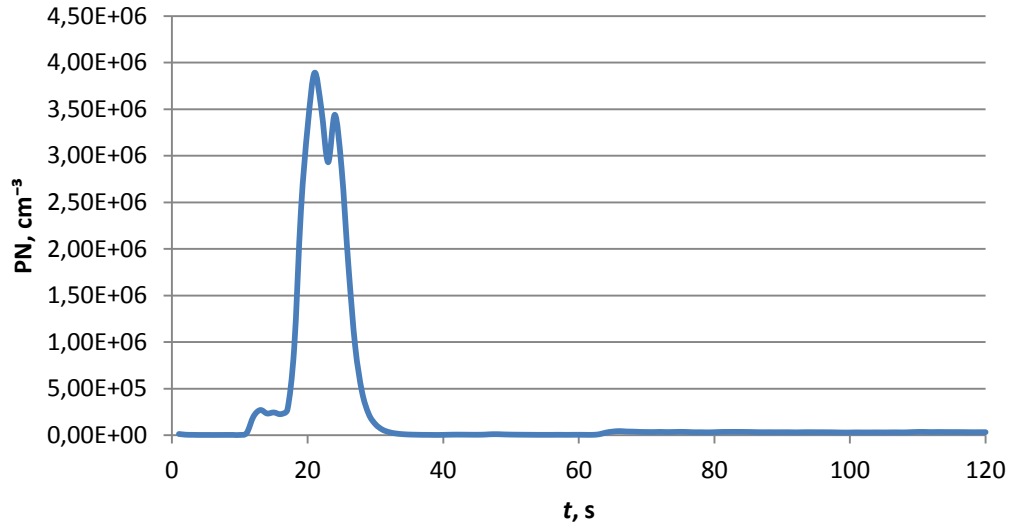
Osim mjerenja u različitim uvjetima rada motora, u pojedinim slučajevima mjerene su i koncentracije PN u ispušnim plinovima prije i nakon obrade DPF-om.

Prilikom provođenja početnih ispitivanja zabilježene su pogreške tijekom mjerenja. Primijećena je pojava pogrešaka uslijed tranzijentnih pojava. U tim trenutcima dolazi do naglog porasta izmjerene vrijednosti PN za nekoliko redova veličina s relativno niskih na vrlo visoke vrijednosti, kao što je vidljivo iz dijagrama na slikama 50. i 51.



Slika 50. Izmjerene vrijednosti PN tijekom 1. ispitivanja pri kojem je zabilježena pogreška

Dijagrami prikazuju promjenu izmjerene vrijednosti PN u ovisnosti o vremenu mjerenja. Tijekom prvog mjerenja (slika 50.) zabilježene su pogreške protoka (*Bypass flow error*, *Dilution flow error*, *CPC flow error*), pogreška omjera razrjeđivanja (*Dilution ratio error*) te pogreška impulsa signala (*Low pulse error*) u trenutku najveće izmjerene vrijednosti PN ($4{,}30 \cdot 10^7$ cm^{-3}). Vidljiv je pritom nagli rast izmjerenih vrijednosti s relativno niskih ($3{,}98 \cdot 10^2 \div 7{,}59 \cdot 10^2$ cm^{-3}) na najveću izmjerenu vrijednost PN.



Slika 51. Izmjerene vrijednosti PN tijekom 2. ispitivanja pri kojem je zabilježena pogreška

Tijekom drugog mjerenja (slika 51.) zabilježene su pogreške protoka (*Dilution flow error*) i impulsa signala (*Low pulse error*). Do pojave pogrešaka došlo je u trenutku naglog

porasta s nižih vrijednosti PN ($1{,}2 \cdot 10^4 \div 2{,}72 \cdot 10^5$ cm^{-3}) do najveće izmjerene vrijednosti PN ($3{,}89 \cdot 10^6$ cm^{-3}). Primjećuje se da je u oba slučaja pojava pogrešaka nastupila pri izmjerenim vrijednostima PN iznad gornje granice raspona rada uređaja ($5 \cdot 10^6$ cm^{-3}).

Oba ispitivanja provedena su na vozilu s GDI motorom prikazanom na slikama 49. i 52.

Za zabilježene pogreške poznati su uzroci njihovog nastajanja:

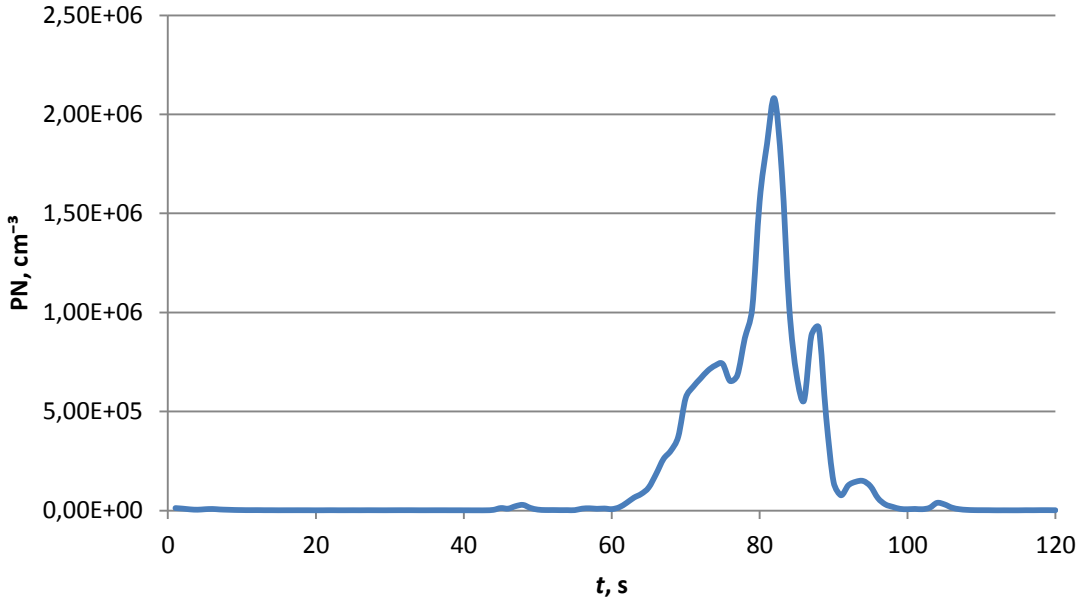
- *Bypass flow error* – protok kroz zaobilazni (*bypass*) vod nalazi se izvan dopuštenog raspona, koji iznosi: 0,6 dm^3/min ± 5 %;
- *Dilution flow error* – protok zraka za razrjeđivanje nalazi se izvan dopuštenog raspona, koji iznosi: 6,3 ± 0,2 dm^3/min;
- *CPC flow error* – protok uzorka kroz CPC brojač nalazi se izvan dopuštenog raspona, koji iznosi: 0,1 ± 0,005 dm^3/min;
- *Dilution ratio error* – faktor razrjeđivanja je izvan dopuštenog raspona;
- *Low pulse error* - visina impulsa signala CPC brojača je preniska. Uzrok tome je nedostatak alkoholnih para ili pojava čestica čija je veličina bliska limitu detekcije uređaja.



Slika 52. Prihvat sonde za uzorkovanje unutar ispušne cijevi ispitnog vozila

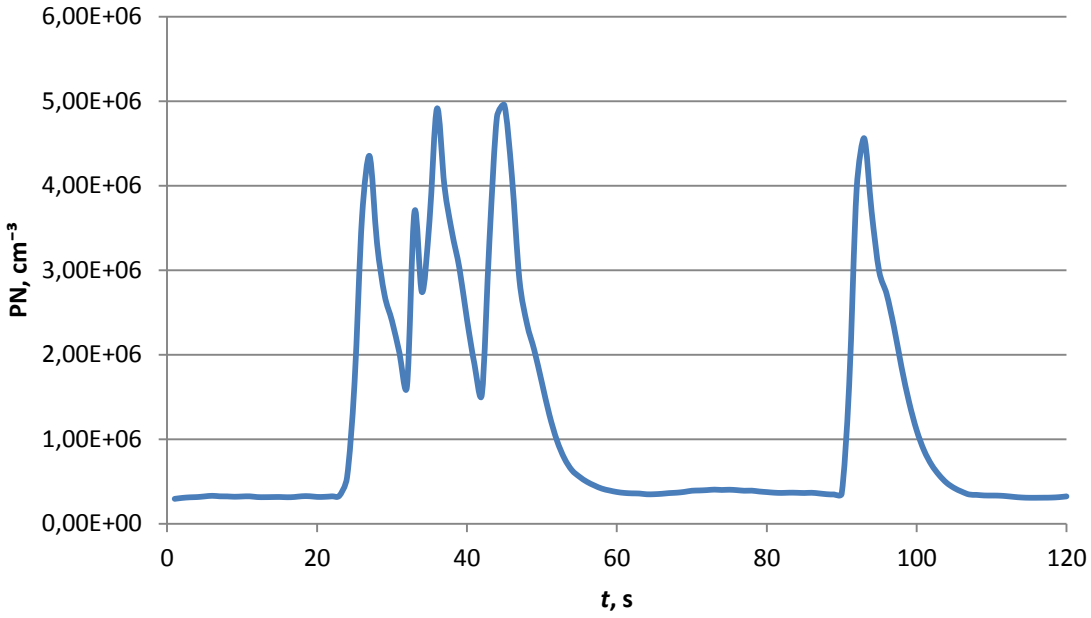
6.1. Inicijalna mjerenja s promjenjivom brzinom vrtnje MSUI

Preostala mjerenja protekla su bez pojave pogrešaka, a za trajanje mjerenja proizvoljno je odabran vremenski period od dvije minute. Tijekom mjerenja s promjenjivom brzinom vrtnje primijećena je korelacija između promjene brzine vrtnje i rasta izmjerenih vrijednosti PN u ispušnim plinovima.



Slika 53. Izmjerene vrijednosti PN tijekom ispitivanja s porastom brzine vrtnje motora

Moguće je to zaključiti i iz dijagrama na slici 53. koji prikazuje promjenu izmjerene vrijednosti PN tijekom cijelog trajanja mjerenja. U prvih 60 sekundi mjerenja motor radi s konstantnom brzinom vrtnje praznog hoda pri čemu su izmjerene vrijednosti PN u rasponu $9{,}78 \cdot 10^2 \div 2{,}83 \cdot 10^4$ cm^{-3}. Nakon 60 sekundi pritiskom pedale gasa postepeno se povećava brzina vrtnje motora, što se u dijagramu očituje porastom izmjerene vrijednosti PN za nekoliko redova veličina do najveće izmjerene vrijednosti od $2{,}08 \cdot 10^6$ cm^{-3}. Postepenim smanjenjem brzine vrtnje smanjuju se izmjerene vrijednosti PN do vrijednosti reda veličine s početka mjerenja, odnosno vrijednosti koje su izmjerene za brzinu praznog hoda.



Slika 54. Izmjerene vrijednosti PN tijekom ispitivanja s višestrukim promjenama brzine vrtnje motora

Iz rezultata mjerenja s višestrukim promjenama brzine vrtnje motora prikazanih u dijagramu na slici 54. ponovno je vidljiva korelacija promjene brzine vrtnje motora i izmjerenih vrijednosti PN u ispušnim plinovima. U ovom slučaju motor nakon 20 sekundi rada u praznom hodu tri puta povećava i smanjuje brzinu vrtnje, a posljedica čega su porasti i smanjenja izmjerene vrijednosti PN. Nakon još jednog perioda rada u praznom hodu brzina vrtnje se pred kraj mjerenja povećava što ponovno uzrokuje porast izmjerene vrijednosti PN.

6.2. Inicijalna mjerenja pri konstantnoj brzini vrtnje MSUI

Provedena su još inicijalna mjerenja pri konstantnoj brzini vrtnje motora na laboratorijskoj kočnici. Za ispitivanje je korišten motor *PSA DV6*, prikazan na slici 55. Karakteristike ispitnog motora dane su u tablici 12.



Slika 55. Ispitni motor *PSA DV6* priključen na hidrauličku kočnicu

Tablica 12. Tehničke karakteristike motora *PSA DV6*

Tip motora	4T s kompresijskim paljenjem (*Dieselov*)
Broj i raspored cilindara	4 cilindra, redni
Radni volumen	$V = 1560\ \text{cm}^3$
Promjer cilindra	$D = 75$ mm
Hod klipa	$H = 88{,}3$ mm
Kompresijski omjer	18:1
Sustav ubrizgavanja	*Common-Rail*
Najveća snaga	$P = 68$ kW pri $n = 4000\ \text{min}^{-1}$
Najveći okretni moment	$M = 230$ Nm pri $n = 1750\ \text{min}^{-1}$

Za vremensko trajanje mjerenja proizvoljno je odabran period od 120 s za radnu točku 1 i 30 s za ostale radne točke.

Ispitivanja su provedena u četiri radne točke motora:

1. Pri konstantnoj brzini vrtnje n = 750 min^{-1} i $M \approx$ 10 Nm;
2. Pri konstantnoj brzini vrtnje n = 1500 min^{-1} i $M \approx$ 22 Nm;
3. Pri konstantnoj brzini vrtnje n = 1500 min^{-1} i $M \approx$ 62 Nm;
4. Pri konstantnoj brzini vrtnje n = 2500 min^{-1} i $M \approx$ 22 Nm.

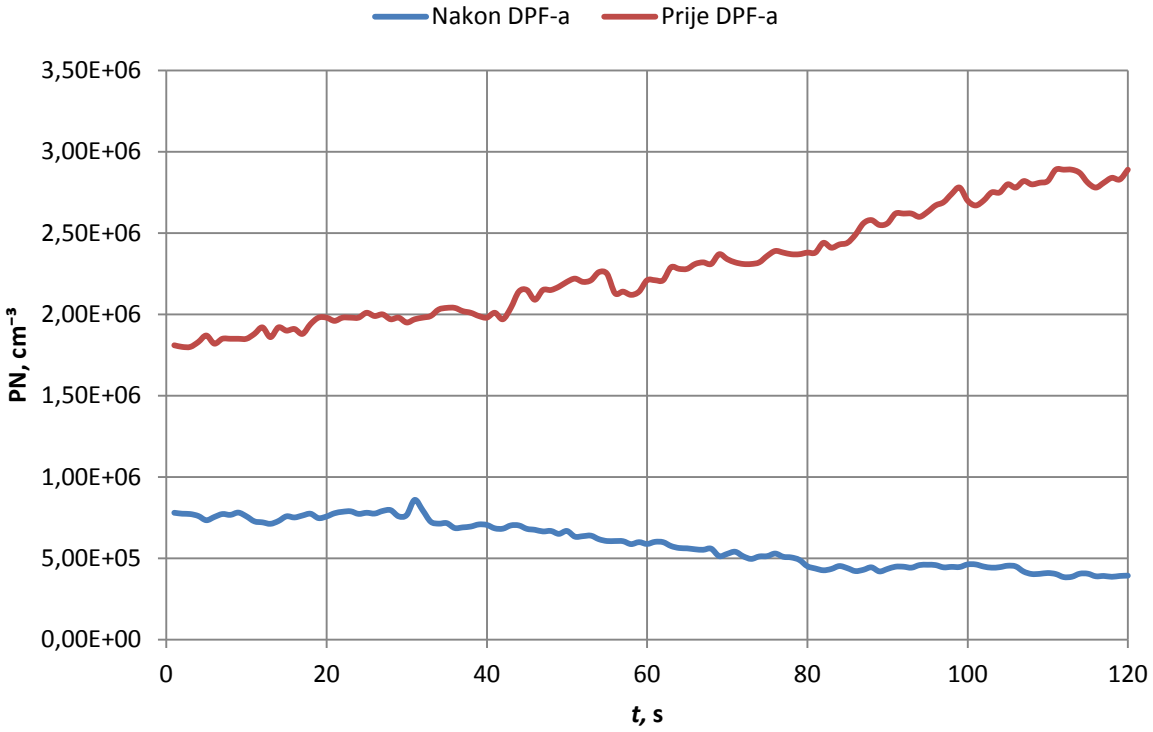
Pritom su mjerenja provedena na uzorku protoka ispušnih plinova prije i nakon prolaska kroz DPF sustav naknadne obrade.



Slika 56. Postavljanje mjerne opreme za mjerenje emisija PN motora *PSA DV6* u ispitnoj kabini

6.2.1. Radna točka 1

U radnoj točki 1 motor radi pri brzini vrtnje praznog hoda 750 min^{-1} uz opterećenje od 15 Nm. U prvom mjerenju mjerene su vrijednosti PN iz ispušnih plinova nakon prolaska kroz DPF. Na isti način provedeno je i mjerenje PN ispred DPF-a, a izmjerene vrijednosti prikazane su u dijagramu na slici 57. i tablici 13.



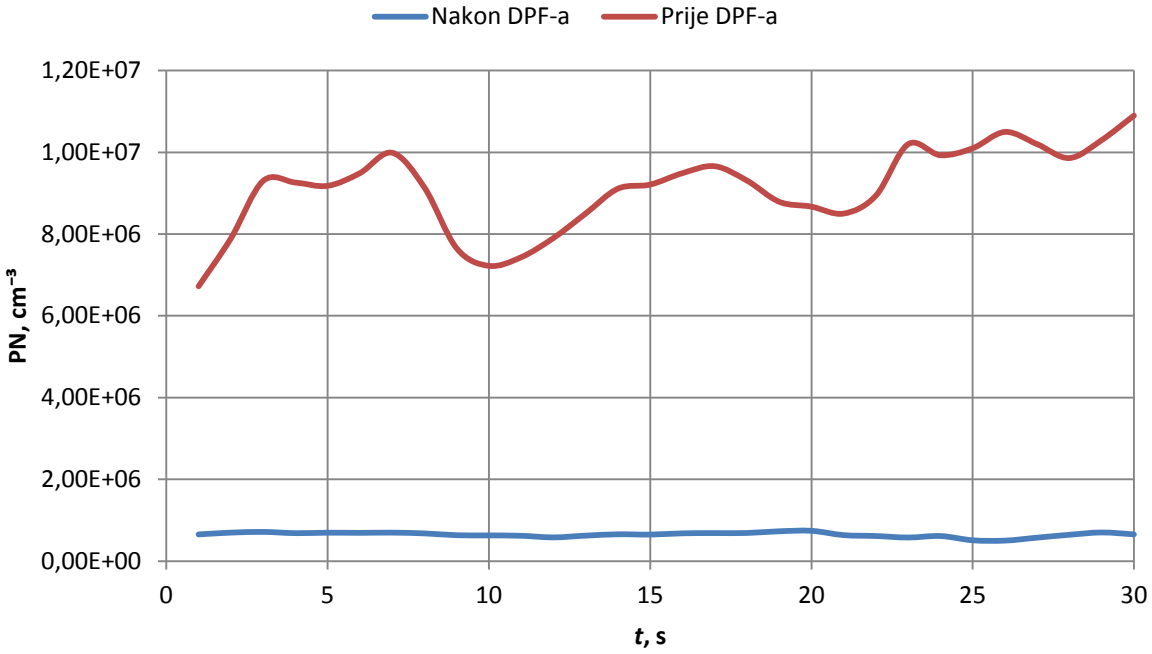
Slika 57. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 1

Tablica 13. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 1

Radna točka	*n*	*M*	PN (cm^{-3})	
#	min^{-1}	Nm	Ispred DPF-a	Iza DPF-a
1	750	10	2,29E+06	5,91E+05

6.2.2. Radna točka 2

U radnoj točki 2 motor radi pri brzini vrtnje 1500 min^{-1} uz opterećenje od 22 Nm. U prvom mjerenju mjerene su vrijednosti PN iz ispušnih plinova nakon prolaska kroz DPF. Na isti način provedeno je i mjerenje PN ispred DPF-a, a izmjerene vrijednosti prikazane su u dijagramu na slici 58. i tablici 14.



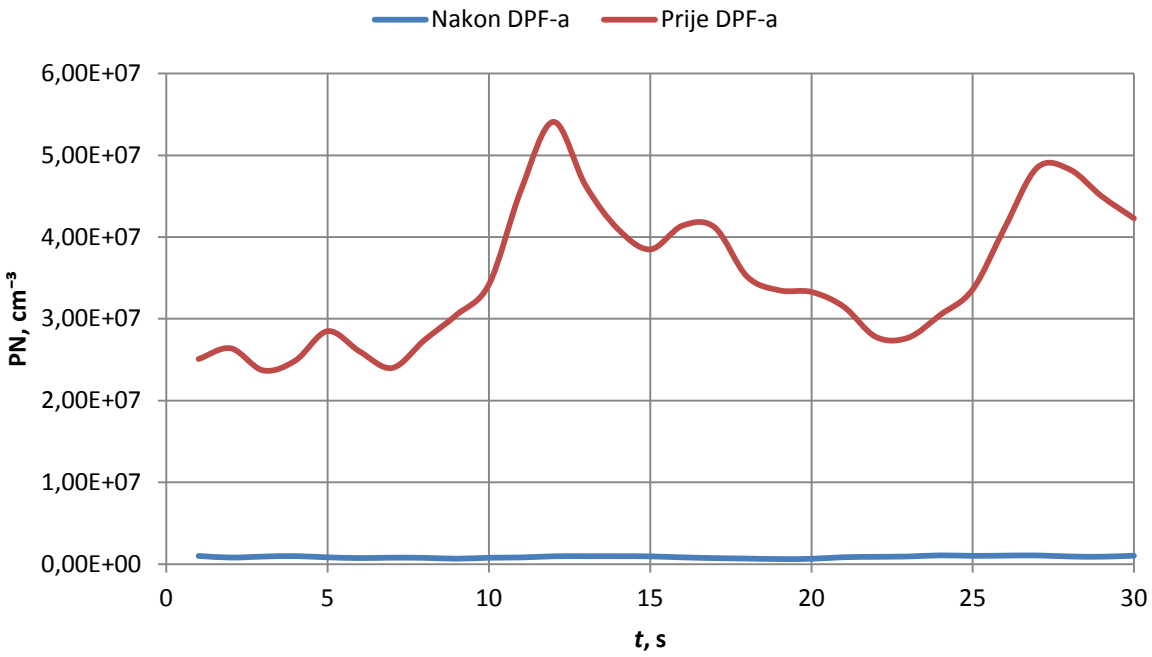
Slika 58. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 2

Tablica 14. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 2

Radna točka	*n*	*M*	PN (cm^{-3})	
#	min^{-1}	Nm	Ispred DPF-a	Iza DPF-a
1	1500	22	9,11E+06	6,46E+05

6.2.3. Radna točka 3

U radnoj točki 3 motor radi pri brzini vrtnje 1500 min^{-1} uz opterećenje od 62 Nm. U prvom mjerenju mjerene su vrijednosti PN iz ispušnih plinova nakon prolaska kroz DPF. Na isti način provedeno je i mjerenje PN ispred DPF-a, a izmjerene vrijednosti prikazane su u dijagramu na slici 59. i tablici 15.



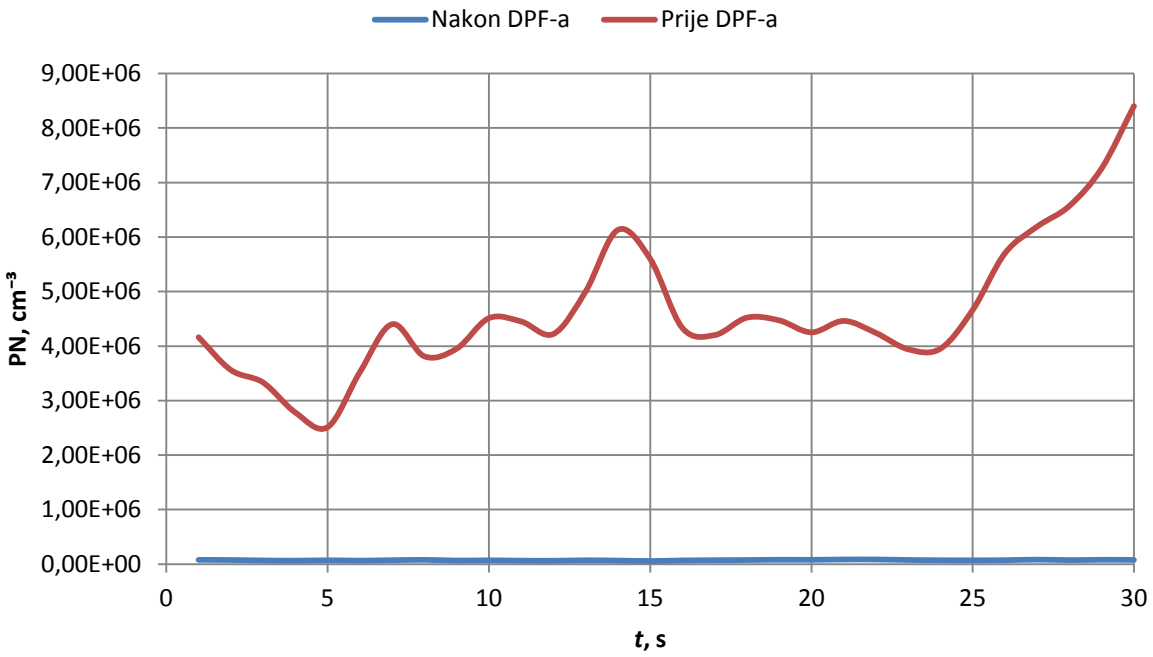
Slika 59. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 3

Tablica 15. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 3

Radna točka	*n*	*M*	PN (cm^{-3})	
#	min^{-1}	Nm	Ispred DPF-a	Iza DPF-a
1	1500	22	3,53E+07	8,72E+05

6.2.4. Radna točka 4

U radnoj točki 4 motor radi pri brzini vrtnje 2500 min^{-1} uz opterećenje od 22 Nm. U prvom mjerenju mjerene su vrijednosti PN iz ispušnih plinova nakon prolaska kroz DPF. Na isti način provedeno je i mjerenje PN ispred DPF-a, a izmjerene vrijednosti prikazane su u dijagramu na slici 60. i tablici 16.



Slika 60. Izmjerene vrijednosti PN prije i nakon prolaska kroz filtar krutih čestica (DPF) tijekom mjerenja u radnoj točki 4

Tablica 16. Prosječne izmjerene vrijednosti PN u radnoj točki 4

Radna točka	*n*	*M*	PN (cm^{-3})	
#	min^{-1}	Nm	Ispred DPF-a	Iza DPF-a
1	1500	22	4,64E+06	7,32E+05

6.2.5. Usporedba koncentracija ispred i iza filtra krutih čestica

Za provedena inicijalna mjerenja emisije PN pri konstantnoj brzini vrtnje, osim prethodno prikazanih dijagrama u ovisnosti o vremenu, tijekom mjerenja u svim radnim točkama izračunate su i prosječne vrijednosti emisije PN te su prikazane u tablici 17.

Tablica 17. Prosječne vrijednosti PN tijekom mjerenja u radnim točkama 1-4

Radna točka	*n*	*M*	PN (cm^{-3})		
#	min^{-1}	Nm	Ispred DPF-a	Iza DPF-a	PNFE (%)
1	750	10	2,29E+06	5,91E+05	74,19
2	1500	22	9,11E+06	6,46E+05	92,91
3	1500	62	3,53E+07	8,72E+05	97,53
4	2500	22	4,64E+06	7,32E+05	98,42

Vidljivo je da su prosječne vrijednosti PN iza filtra u svim radnim točkama mjerenja manje od prosječnih vrijednosti PN ispred filtra krutih čestica. Na temelju razlike prosječnih vrijednosti izmjerenih ispred i iza filtra krutih čestica može se utvrditi njegova efikasnost filtracije. Efikasnost filtracije izračunata je prema izrazu:

$$PNFE = \frac{PN_{ispred} - PN_{iza}}{PN_{ispred}} \cdot 100 \quad \textbf{(2)}$$

Gdje je:

PNFE – efikasnost filtracije filtra krutih čestica;

PN_{ispred} – prosječna izmjerena vrijednost emisije PN ispred filtra krutih čestica;

PN_{iza} – prosječna izmjerena vrijednost emisije PN iza filtra krutih čestica.

Na temelju rezultata prikazanih u tablici 17., vidljivo je da je najniža efikasnost filtracije u radnoj točki 1, odnosno pri najnižoj brzini vrtnje i opterećenju, što je u skladu s istraživanjem [33]. S povećanjem brzine vrtnje efikasnost filtracije raste, a isto je slučaj i s povećanjem opterećenja motora.

7. ISPITIVANJE EMISIJE PN U ISPUŠNIM PLINOVIMA NECESTOVNOG POKRETNOG STROJA

Za provođenje mjerenja analizatorom *TSI 3795* odabrano je ispitivanje emisije PN necestovnog pokretnog stroja (NCPS). Prema [34] NCPS definiran je kao svaki pokretni stroj, prenosiva oprema ili vozilo s karoserijom ili bez nje i kotačima ili bez njih koji nisu namijenjeni za cestovni prijevoz putnika ili robe, i uključuju strojeve ugrađene na podvozje vozila namijenjenih za cestovni prijevoz putnika ili robe. Primjeri takvih strojeva su: oprema za uređenje vrta i okućnice, građevinski strojevi, viličari, mobilni granici, kompresori, pumpe, generatori, plovila za plovidbu unutarnjim vodama, lokomotive i vlakovi, *off-road* vozila i dr.

7.1. Zakonska ograničenja emisija motora NCPS

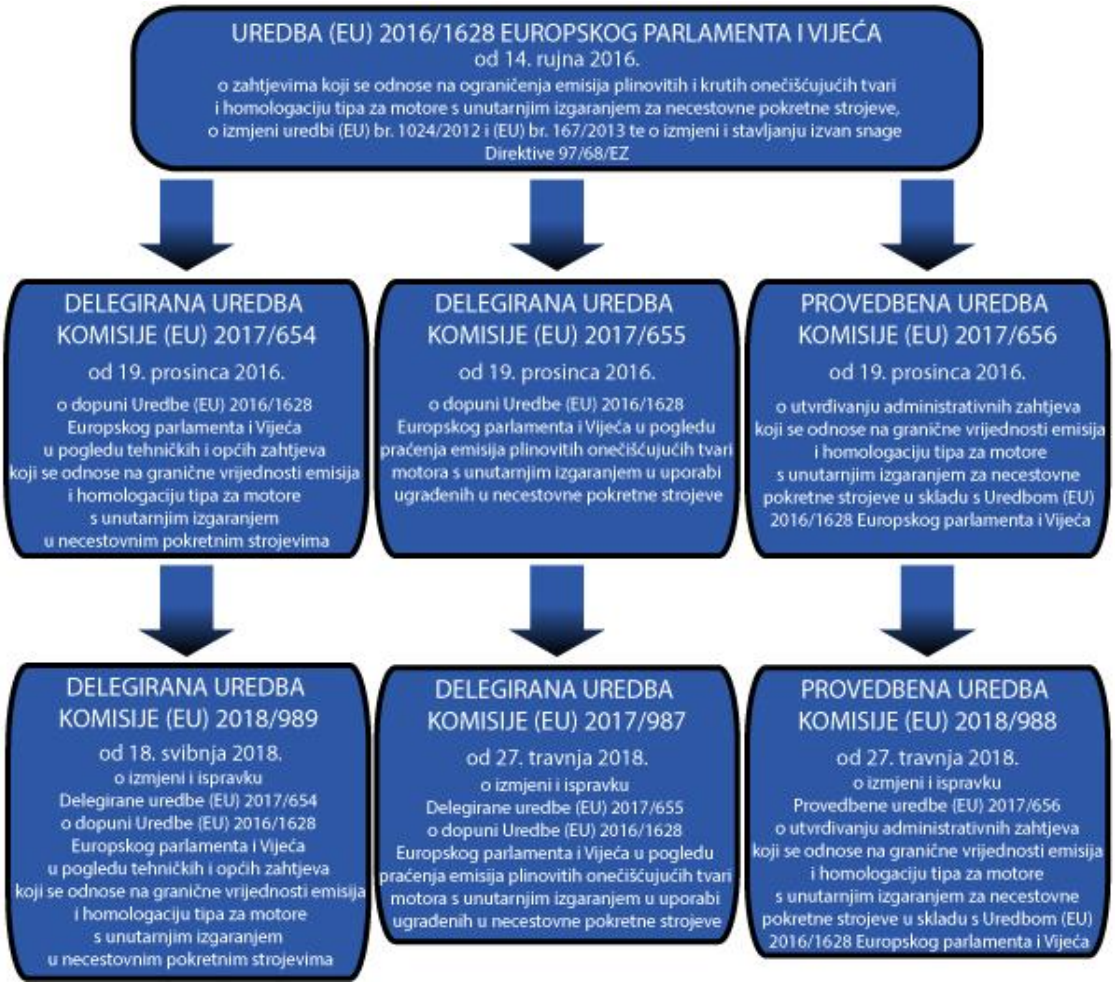
Uredbom (EU) 2016/1628 Europskog parlamenta i Vijeća utvrđena su ograničenja emisija plinovitih i krutih onečišćujućih tvari za motore s unutarnjim izgaranjem definirane posebnim kategorijama, koji su ugrađeni ili su namijenjeni ugradnji u NCPS. Utvrđeni su i administrativni i tehnički zahtjevi vezani uz EU homologaciju tipa, a Uredba definira i zahtjeve za nadzor tržišta navedenih motora. Stupanjem na snagu Uredbe (EU) 2016/1628, 1. siječnja 2017. stavljena je izvan snage Direktiva 97/68/EZ koju Uredba zamjenjuje.

MSUI na koje se odnosi Uredba podijeljeni su unutar ukupno deset kategorija, ovisno o njihovoj namjeni i tehničkim karakteristikama. Osnovna je podjela u deset kategorija kao što slijedi:

1. NRE kategorija – motori za NCPS, prikladni za vožnju ili prevoženje, koji nisu obuhvaćeni nijednom drugom kategorijom;
2. NRG kategorija – motori snage veće od 560 kW koji se koriste isključivo u generatorima električne struje;
3. NRSh kategorija – motori s vanjskim izvorom paljenja i snagom manjom od 19 kW namjenjeni uporabi u ručnim strojevima;
4. NRS kategorija – motori motori s vanjskim izvorom paljenja i snagom manjom od 56 kW koje ne obuhvaća kategorija NRSh;
5. IWP kategorija – motori snage veće od 19 kW koji se koriste za pogon plovila unutarnje plovidbe;

6. IWA kategorija – pomoćni motori plovila unutarnje plovidbe snage veće od 19 kW;
7. RLL kategorija – motori za pogon lokomotiva;
8. RLR kategorija – motori za pogon motornih vagona;
9. SMB kategorija – motori s vanjskim izvorom paljenja korišteni u motornim saonicama;
10. ATS kategorija – motori s vanjskim izvorom paljenja korišteni u ATV (engl. *All-Terrain Vehicle*) i SbS (engl. *Side-by-Side*) vozilima.

Nakon donošenja Uredbe (EU) 2016/1628 uslijedilo je donošenje niza povezanih propisa Europske Unije koje u sebi sadrže dopune, izmjene i ispravke izvorne uredbe, a njihova je kronologija donošenja prikazana na slici 61.



Slika 61. Kronologija donošenja Uredbe (EU) 2016/1628 i njenih izmjena i dopuna

7.1.1. NRE kategorija motora

Prema [34] NRE kategorija motora obuhvaća vrlo širok raspon MSUI. Riječ je o motorima koji nisu obuhvaćeni drugim kategorijama, a namjenjeni su ugradnji u pokretne strojeve namjenjene vožnji ili prevoženju ili koji se primjenjuju umjesto motora drugih kategorija. Najčešća je primjena motora ove kategorije u građevinskim strojevima, strojevima za prenošenje i dizanje, generatorima i pumpama i dr. U tablici 18. dane su granične vrijednosti NRE kategorije u skladu sa V. stupnjem emisije prema Uredbi.

Tablica 18. Granične vrijednosti emisija V. stupnja kategorije motora NRE [34]

Stupanj emisije	Potkategorija motora	Raspon snage	Vrsta paljenja	CO	HC	NO_x	Masa PM	PN	A
		kW		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	1/kWh	
V.	NRE-v-1 NRE-c-1	$0 < P < 8$	CI	8,00	$(HC + NO_x \leq 7{,}50)$		0,40[(1)]	-	1,10
V.	NRE-v-2 NRE-c-2	$8 \leq P < 19$	CI	6,60	$(HC + NO_x \leq 7{,}50)$		0,40	-	1,10
V.	NRE-v-3 NRE-c-3	$19 \leq P < 37$	CI	5,00	$(HC + NO_x \leq 4{,}70)$		0,015	$1 \cdot 10^{12}$	1,10
V.	NRE-v-4 NRE-c-4	$37 \leq P < 56$	CI	5,00	$(HC + NO_x \leq 4{,}70)$		0,015	$1 \cdot 10^{12}$	1,10
V.	NRE-v-5 NRE-c-5	$56 \leq P < 130$	sve	5,00	0,19	0,40	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	1,10
V.	NRE-v-6 NRE-c-6	$130 \leq P \leq 560$	sve	3,50	0,19	0,40	0,015	$1 \cdot 10^{12}$	1,10
V.	NRE-v-7 NRE-c-7	$P > 560$	sve	3,50	0,19	3,50	0,045	-	6,00

(1) 0,60 za zrakom hlađene motore s izravnim ubrizgavanjem koji se mogu paliti ručno.

Budući da je ispitni stroj bager deklarirane snage motora 105 kW prema Uredbi njegov pogonski motor pripadao bi potkategoriji NRE-v-5 za koju propisana granična vrijednost emisije PN iznosi $1 \cdot 10^{12}$ 1/kWh.

7.2. Ispitni stroj

Odabrani NCPS za ispitivanje građevinski je stroj *Liebherr A914*, prikazan na slici 62. Riječ je o bageru s kotačima pogonjenim MSUI s kompresijskim paljenjem čija se snaga na radni dio uređaja i sustav za pokretanje prenosi hidrauličkim sustavom. Tehničke karakteristike motora navedene su u tablici 19.



Slika 62. Bager *Liebherr A914* [35]



Slika 63. Pogonski sustav bagera *Liebherr A914*

Tablica 19. Tehničke karakteristike motora

Pogonski motor	4T s kompresijskim paljenjem (*Dieselov*)
Sustav ubrizgavanja	*Common-Rail*
Deklarirana snaga (prema ISO 9249)	P = 105 kW pri n = 1800 min^{-1}
Radni volumen motora	V = 4,5 dm^3
Promjer cilindra	D = 104 mm
Hod klipa	H = 132 mm
Sustav za naknadnu obradu ispušnih plinova	SCR

Pogonski MSUI, prikazan na slici 63., zadovoljava stupanj IV. emisija ispušnih plinova, koji je definiran Direktivom 2004/26/EZ, a čije su granične vrijednosti emisija ispušnih plinova prikazane u tablici 20.

Tablica 20. Granične vrijednosti emisija ispušnih plinova IV. stupnja emisija prema [36]

Kategorija	Efektivna snaga	CO	HC	NO_x	Masa krutih čestica (PM)
	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Q	$130 \leq P \leq 560$	3,5	0,19	0,4	0,025
R	$56 \leq P < 130$	5,0	0,19	0,4	0,025

Kako bi zadovoljio uvjete IV. stupnja stroj je opremljen SCR katalizatorom. Budući da IV. stupnjem emisija nije propisana kontrola emisije PN, DPF nije obvezni dio opreme stroja.

7.3. Ispitna procedura

Ispitivanje je provedeno kao niz mjerenja kojima bi se evaluirao rad analizatora *TSI 3795* te ispitale vrijednosti emisija PN u ispušnim plinovima bagera *Liebherr A914* kao reprezentativnog NCPS za tržište Republike Hrvatske. Korištenje ispitnog stroja i prostora za potrebe ispitivanja osigurala je tvrtka Komop d.o.o.

Mjerenja su provođena pri konstantnim brzinama vrtnje motora bez opterećenja. Budući da je stroj u mogućnosti raditi u 10 različitih radnih točaka s konstantnom brzinom vrtnje, mjerenja su obavljena za svaku pojedinu radnu točku, u kontrolnom i općem načinu rada analizatora. Cilj takvog mjerenja je usporediti vrijednosti rezultata mjerenja različitim

načinima i utvrditi eventualne razlike u izmjerama. Dakako, zbog složenosti procedure mjerenja u kontrolnom načinu rada uređaja, u općem načinu mjerenja nije ih moguće u potpunosti replicirati. Važan je utjecaj i frekvencije prikupljanja izmjerenih podataka koja je bitno različita za ova dva načina rada. U kontrolnom načinu mjerenja navedena frekvencija iznosi 10 Hz, a pri provođenju mjerenja u općem načinu frekvencija je 1 Hz. Osim toga, za potpuno poklapanje ispitivanja potrebno je eliminirati i druge vanjske utjecajne faktore poput trenutnih promjena okolišnih uvjeta i parametara motora u tijeku mjerenja, što nije moguće bez simultanog mjerenja dvama analizatorima.

7.4. Tijek ispitivanja

Ispitivanje je podijeljeno na dva dijela:

1. 10 mjerenja u kontrolnom načinu rada analizatora,
2. 10 mjerenja u općem načinu rada analizatora.

Nakon postavljanja opreme (slika 64.), uključivanja analizatora i njegovog povezivanja s računalom provedeno je mjerenje bez pokretanja motora stroja kako bi se izmjerila vrijednost PN u ispušnoj cijevi stroja. Utvrđena je prosječna izmjerena vrijednosti PN u iznosu od 18200 cm^{-3}. Prije početka mjerenja pokrenut je motor stroja i ostavljen da radi nekoliko minuta u praznom hodu uz povremenu promjenu brzine vrtnje kako bi se postigla zadovoljavajuća radna temperatura rashladne tekućine i ulja motora prije početka ispitivanja.



Slika 64. Postavljanje mjerne opreme

Nakon zagrijavanja motora provedena su mjerenja u kontrolnom načinu rada analizatora, međutim već je prvo mjerenje poništeno i označeno nevažećim zbog pojave pogreške „*Low pulse*“ koja se javlja u slučaju potrošenosti radne tekućine ili pojave čestica promjera bliskog granici detekcije uređaja. Prvi uzrok pojave pogreške uklonjen je promjenom radne tekućine analizatora. Unatoč tome, pravi uzrok javljanja pogreške uređaja uklonjen je isključivanjem klimatizacijskog sustava u kabini, čije je automatsko uključivanje tijekom mjerenja uzrokovalo tranzijentne promjene rada motora tijekom mjerenja, odnosno prelazak iz stacionarnog u tranzijentni način rada. Izvješće nevažećeg mjerenja prikazano je na slici 65.

6/18/2019 4:21:37 PM

Model:	3795	**Manufacturer:**	TSI Inc.
Serial:	3795181201	**Last Calibration:**	2019-03-20
Firmware Version:	1.1	**Application Version:**	1.1.0.0
Application Key:	8612-8147-AE99-9A0C-AF5E-84C2-15D4-619A		

University of Zagreb Faculty of Mechanical Engineering
Ivana Lucica 5
HR-10000 Zagreb
zoran.lulic@fsb.hr

OFFICIAL MEASUREMENT

Date/Time:	2019-06-18, 16:20:55	**Mean #1 (1/cm³):**	6.74E5
Duration:	00:00:40	**Mean #2 (1/cm³):**	1.95E6
Operator:	DR	**Mean #3 (1/cm³):**	1.43E6
Machine Make:	Liebherr	**Overall Mean (1/cm³):**	Invalid
Machine Model:	914	**Limit (1/cm³):**	2.5E5
Machine Id:	a914	**Result:**	**INVALID**
Engine Id:	a914		

Ambient Conditions: *27.5 °C, 100.0 kPa, 56 %RH*

Instrument errors were detected during the measurement.

SIGNATURE:

Slika 65. Izvješće nevažećeg mjerenja poništenog zbog pojave pogreške

6/18/2019 4:49:09 PM

Model:	3795	**Manufacturer:**	TSI Inc.
Serial:	3795181201	**Last Calibration:**	2019-03-20
Firmware Version:	1.1	**Application Version:**	1.1.0.0
Application Key:	8612-8147-AE99-9A0C-AF5E-84C2-15D4-619A		

University of Zagreb Faculty of Mechanical Engineering
Ivana Lucica 5
HR-10000 Zagreb
zoran.lulic@fsb.hr

OFFICIAL MEASUREMENT

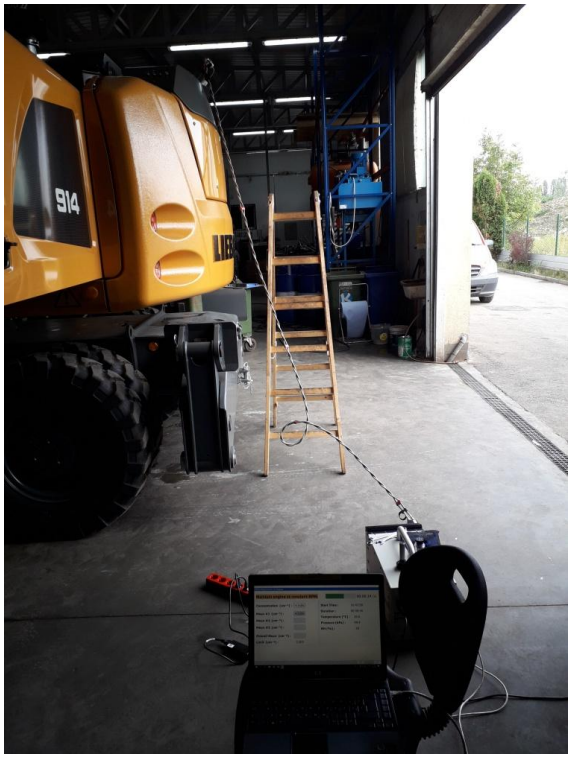
Date/Time:	2019-06-18, 16:48:28	**Mean #1 (1/cm³):**	2.36E6
Duration:	00:00:40	**Mean #2 (1/cm³):**	2.39E6
Operator:	DR	**Mean #3 (1/cm³):**	2.33E6
Machine Make:	Liebherr	**Overall Mean (1/cm³):**	2.36E6
Machine Model:	A914	**Limit (1/cm³):**	2.5E5
Machine Id:	A914	**Result:**	**FAIL**
Engine Id:	4/10, bez klime		

Ambient Conditions: *27.3 °C, 99.9 kPa, 60 %RH*

SIGNATURE:

Slika 66. Izvješće provedenog mjerenja u kontrolnom načinu rada analizatora pri razini brzine vrtnje motora 4/10

Po završetku kondicioniranja motora i uklanjanja pogreške, započelo se s obavljanjem mjerenja u kontrolnom načinu rada analizatora prema propisanoj proceduri (slika 67.). Operater stroja izvršio je 4-6 slobodnih ubrzavanja motora prije početka mjerenja te odredio odgovarajuću konstantnu brzinu vrtnje motora za vrijeme trajanja mjerenja. Kao što je već napomenuto, obavljeno je ukupno 10 mjerenja, po jedno za svaku brzinu vrtnje motora. Nakon izračunavanja srednjih vrijednosti emisija PN izrađena su izvješća s rezultatima za analizu. Zbog lakšeg vođenja evidencije i naknadne analize rezultata na mjestu identifikacije motora (*Engine Id*) zabilježena je napomena o brzine vrtnje i uključenosti klima-uređaja, kao što je vidljivo na slici 66.



Slika 67. Provođenje mjerenja u kontrolnom načinu rada uređaja

Nakon završetka mjerenja u kontrolnom rada za sve radne točke, provedena su mjerenja u općem načinu rada analizatora za iste radne točke. Mjerenja su provedena u vremenskom trajanju od jedne minute. Između mjerenja nije se provodilo kondicioniranje motora, jer je u tom trenutku motor postigao radnu temperaturu, već su mjerenja provedena s kratkim među-stankama dovoljnim za evidentiranje novog mjerenja, promjenu brzine vrtnje motora od strane operatera i stabilizaciju brzine vrtnje. Tijekom trajanja mjerenja održavana je konstantna brzina vrtnje motora. Nakon završetka mjerenja izrađena su izvješća s rezultatima za analizu.

7.5. Rezultati ispitivanja

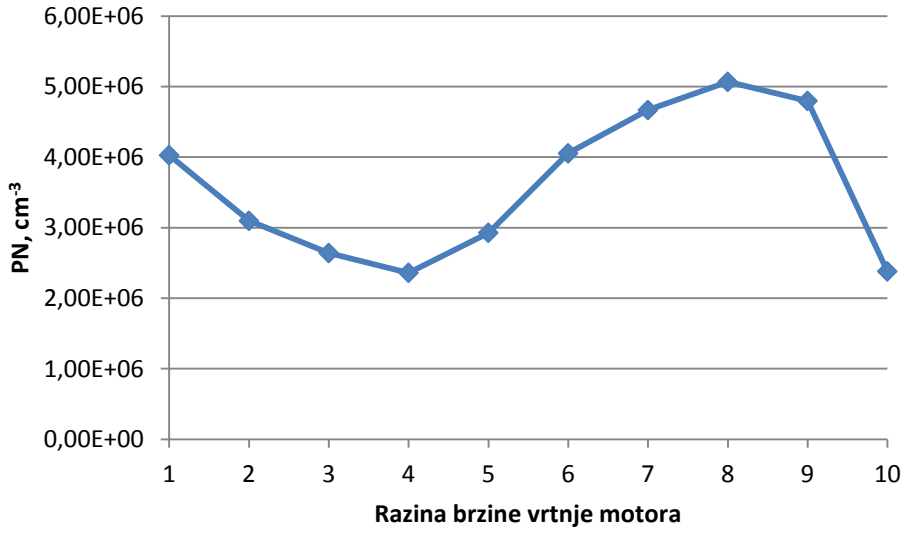
7.5.1. Kontrolni način mjerenja

Izvješće kontrolnog načina mjerenja prikazuje podatke isključivo o prosječnim vrijednostima emisija PN unutar mjerenja. U tablici 21. prikazane su izračunate vrijednosti za svako pojedino mjerenje te ukupna srednja vrijednost emisije PN u 10 radnih točaka motora u kojima su izvršena mjerenja.

Tablica 21. Izračunate srednje vrijednosti emisija PN u pojedinim radnim točkama

Razina brzine vrtnje motora	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Ukupna srednja vrijednost
	cm^{-3}	cm^{-3}	cm^{-3}	cm^{-3}
1/10	4,02E+06	4,04E+06	4,02E+06	4,03E+06
2/10	3,12E+06	3,09E+06	3,08E+06	3,10E+06
3/10	2,62E+06	2,65E+06	2,65E+06	2,64E+06
4/10	2,36E+06	2,39E+06	2,33E+06	2,36E+06
5/10	2,83E+06	2,91E+06	3,04E+06	2,93E+06
6/10	4,01E+06	4,08E+06	4,07E+06	4,05E+06
7/10	4,64E+06	4,74E+06	4,62E+06	4,67E+06
8/10	5,06E+06	5,07E+06	5,07E+06	5,07E+06
9/10	4,86E+06	4,85E+06	4,68E+06	4,80E+06
10/10	2,28E+06	2,55E+06	2,31E+06	2,38E+06

U dijagramu na slici 68. prikazana je promjena ukupne srednje vrijednosti emisije PN u ovisnosti o brzini vrtnje motora.



Slika 68. Dijagram promjene prosječne vrijednosti emisije PN u ovisnosti o brzini vrtnje motora u kontrolnom načinu mjerenja

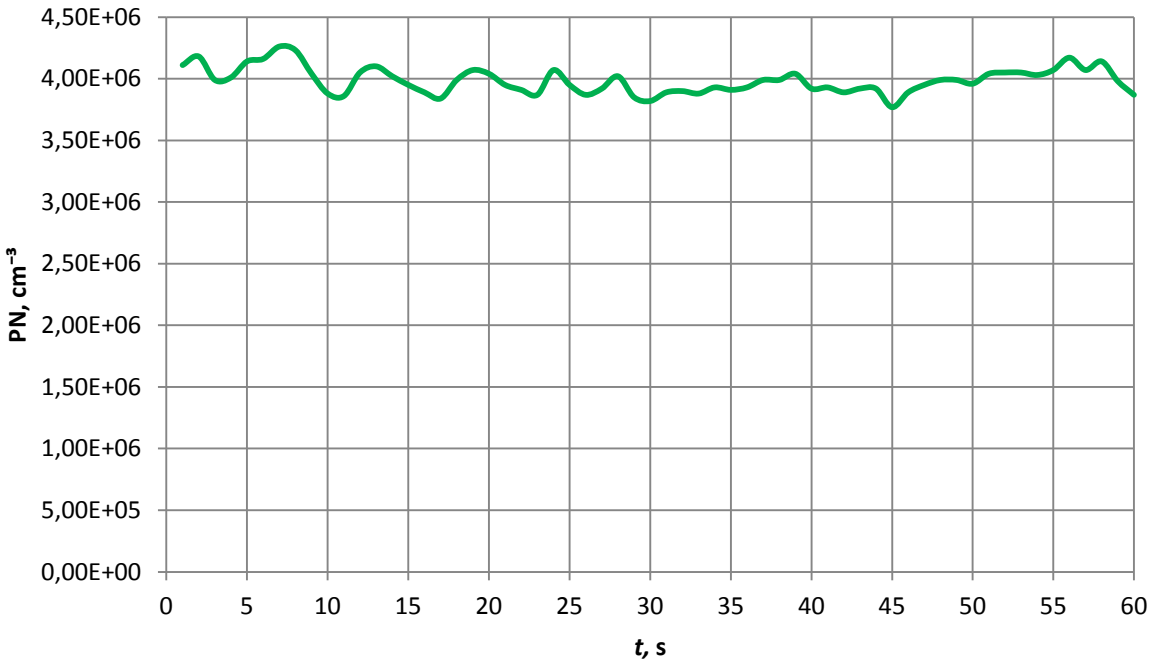
7.5.2. Opći način mjerenja

7.5.2.1. Radna točka 1

U radnoj točki 1 motor radi bez opterećenja, a brzina vrtnje motora najmanja je moguća, simbolički označena s 1/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 22. U dijagramu na slici 69. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 22. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 1/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$3{,}77 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$4{,}26 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$3{,}99 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$1{,}05 \cdot 10^5$
Koeficijent varijacije (%)	2,63



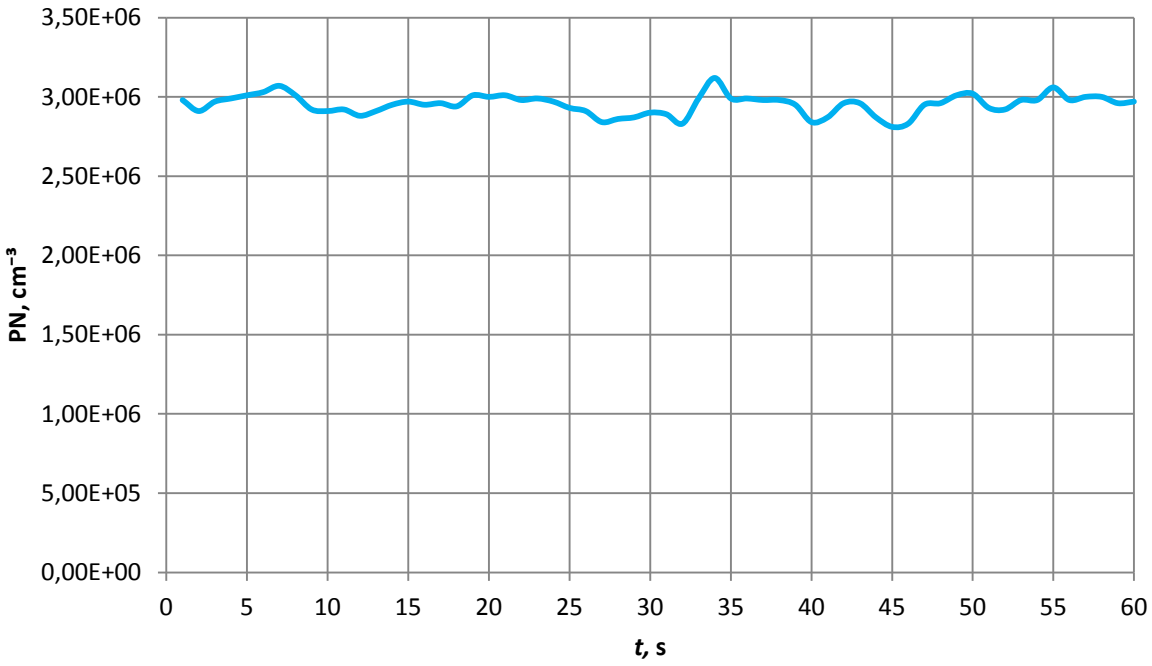
Slika 69. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 1

7.5.2.2. Radna točka 2

U radnoj točki 2 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 2/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 23. U dijagramu na slici 70. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 23. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 2/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$2{,}81 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$3{,}12 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$2{,}95 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$6{,}22 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	2,11



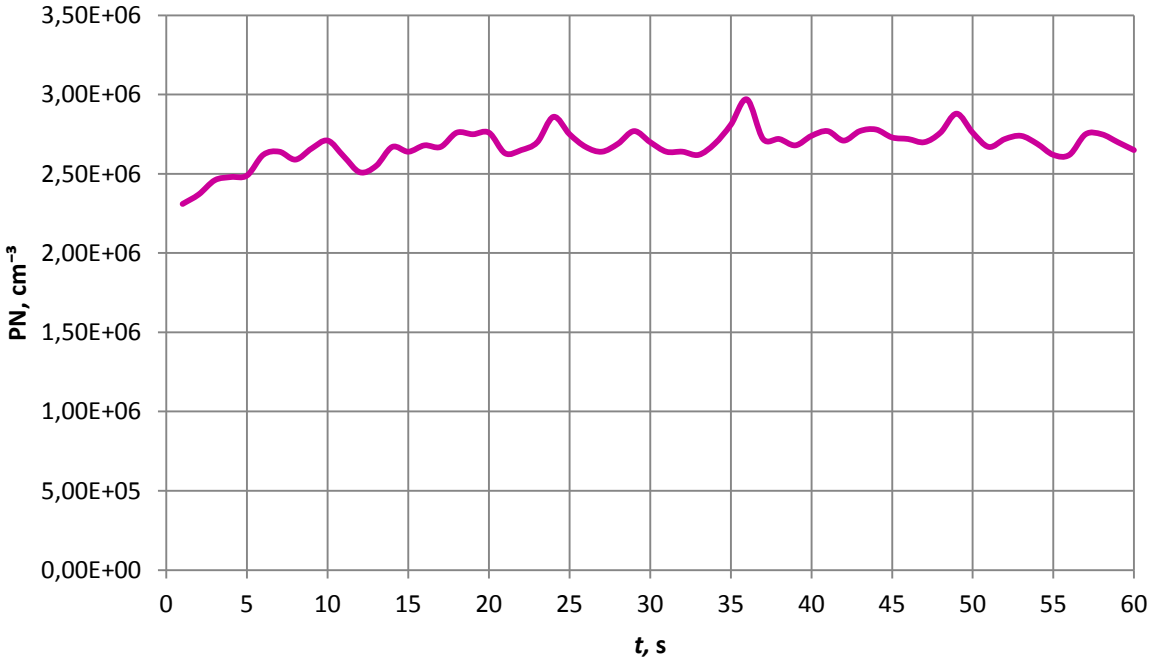
Slika 70. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 2

7.5.2.3. Radna točka 3

U radnoj točki 3 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 3/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 24. U dijagramu na slici 71. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 24. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 3/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$2{,}31 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$2{,}97 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$2{,}68 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$1{,}10 \cdot 10^5$
Koeficijent varijacije (%)	4,11



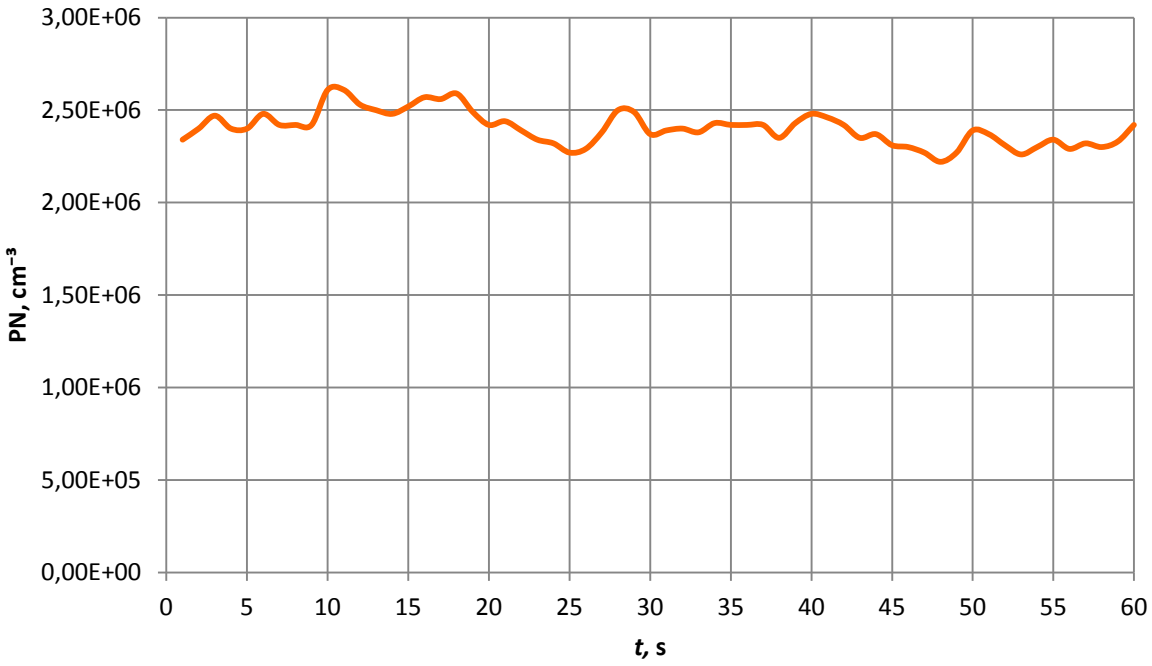
Slika 71. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 3

7.5.2.4. Radna točka 4

U radnoj točki 4 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 4/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 25. U dijagramu na slici 72. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 25. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 4/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$2{,}22 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$2{,}61 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$2{,}40 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$9{,}15 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	3,81



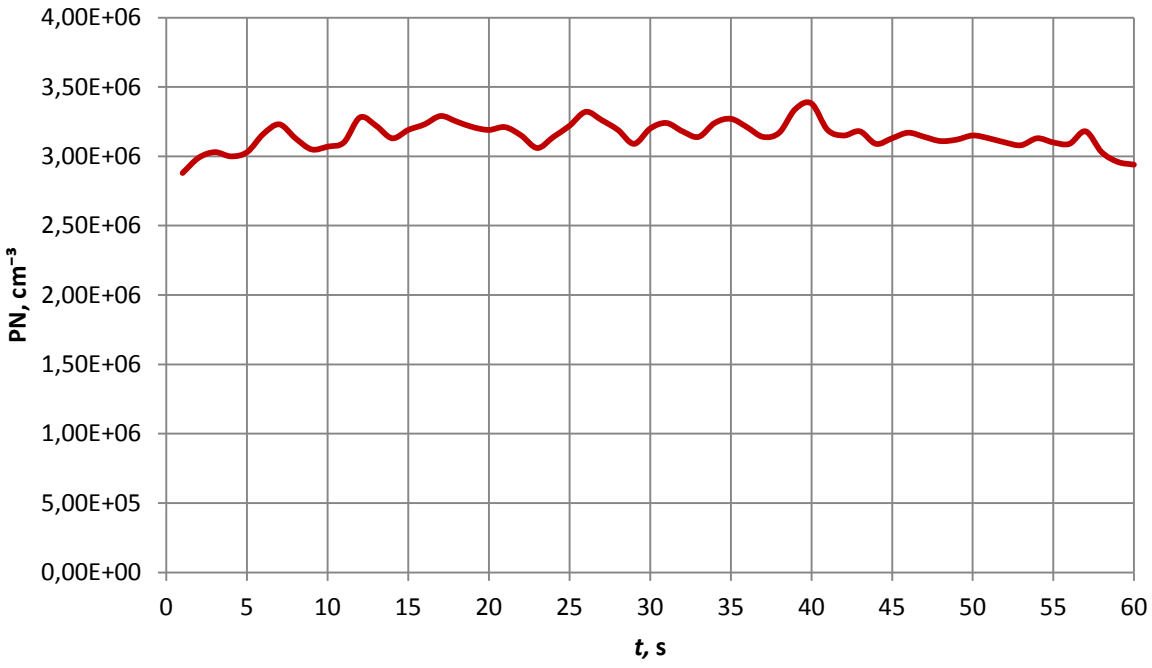
Slika 72. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 4

7.5.2.5. Radna točka 5

U radnoj točki 5 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 5/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 26. U dijagramu na slici 73. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 26. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 5/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$2{,}88 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$3{,}38 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$3{,}15 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$9{,}66 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	3,07



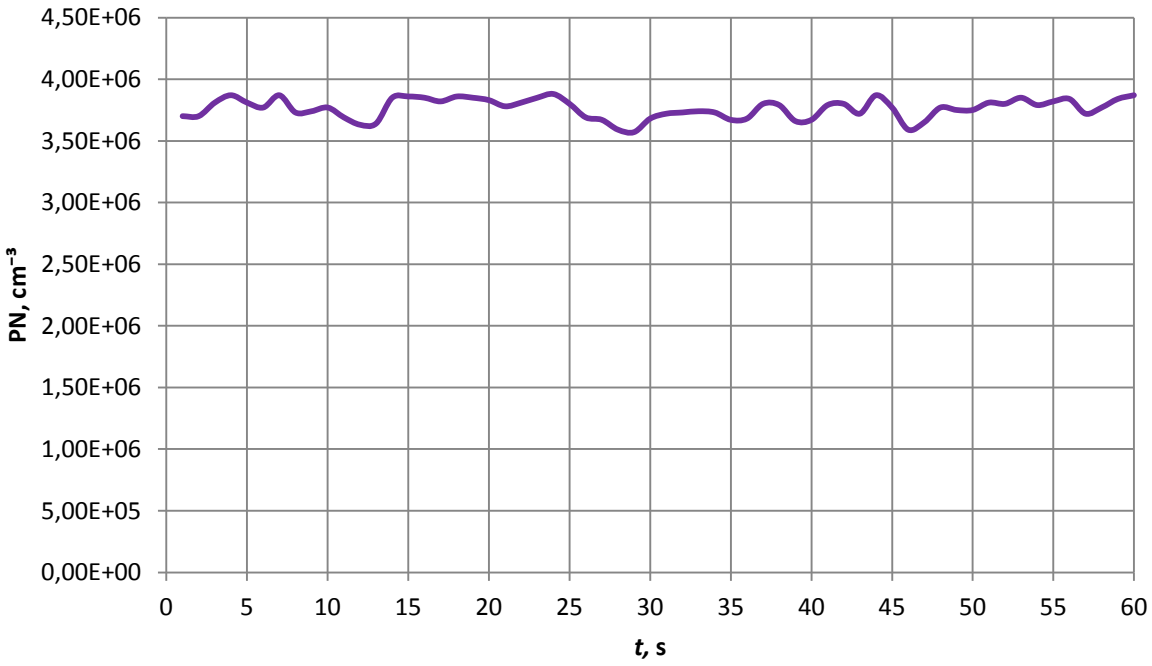
Slika 73. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 5

7.5.2.6. Radna točka 6

U radnoj točki 6 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 6/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 27. U dijagramu na slici 74. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 27. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 6/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$3{,}57 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$3{,}88 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$3{,}76 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$8{,}00 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	2,13



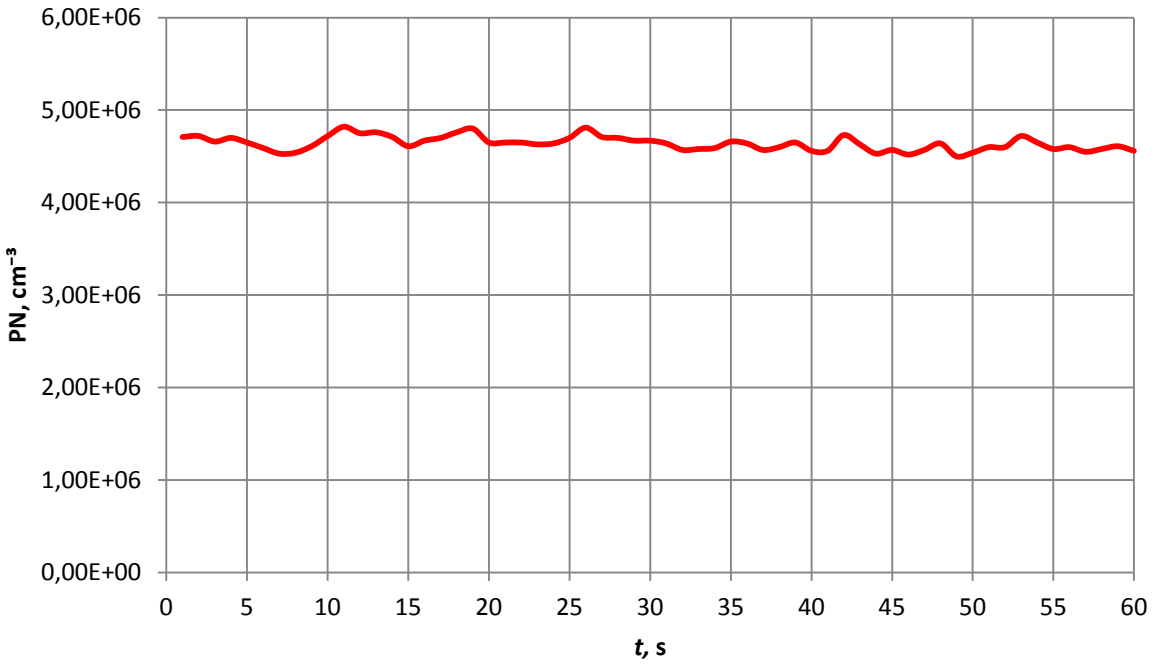
Slika 74. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 6

7.5.2.7. Radna točka 7

U radnoj točki 7 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 7/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 28. U dijagramu na slici 75. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 28. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 7/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$4{,}50 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$4{,}82 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$4{,}64 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$7{,}65 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	1,65



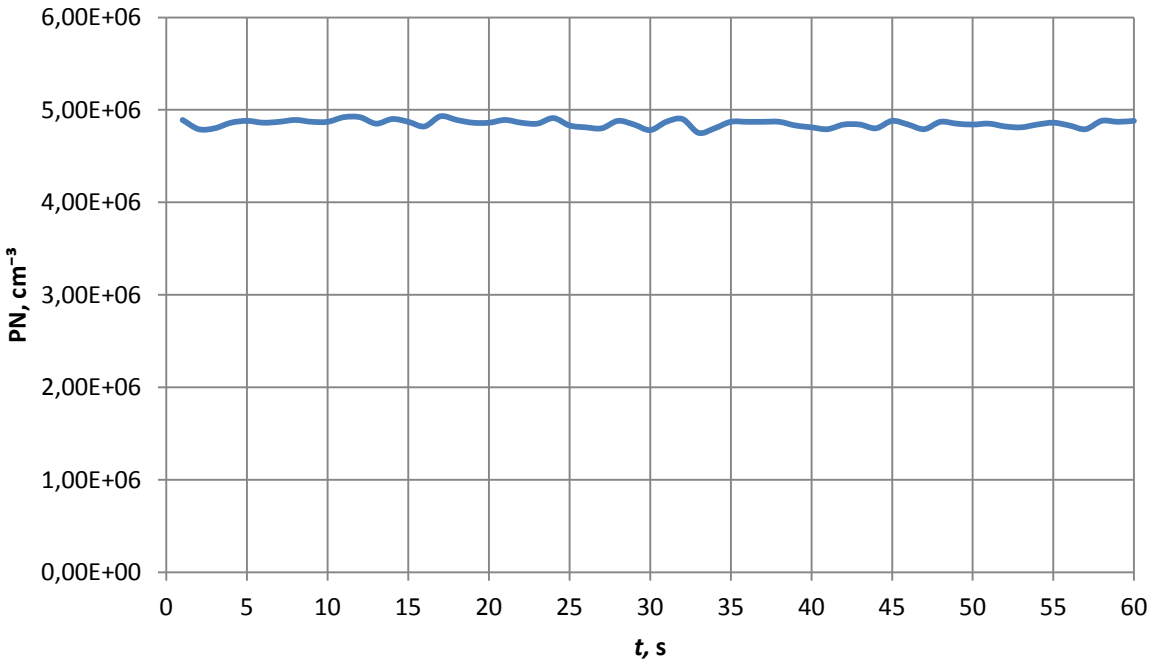
Slika 75. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 7

7.5.2.8. Radna točka 8

U radnoj točki 8 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 8/10. Tijekom mjerenja u radnoj točki 8 izmjerena je najveća vrijednost emisije PN, kao i najveća srednja vrijednost. Uz to, tijekom ovog mjerenja najmanje je odstupanje od srednje vrijednosti emisije uz standardnu devijaciju $3{,}81 \cdot 10^4$ cm^{-3} i koeficijent varijacije 0,79 %. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 29. U dijagramu na slici 76. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 29. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 8/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$4{,}75 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$4{,}93 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$4{,}85 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$3{,}81 \cdot 10^4$
Koeficijent varijacije (%)	0,79



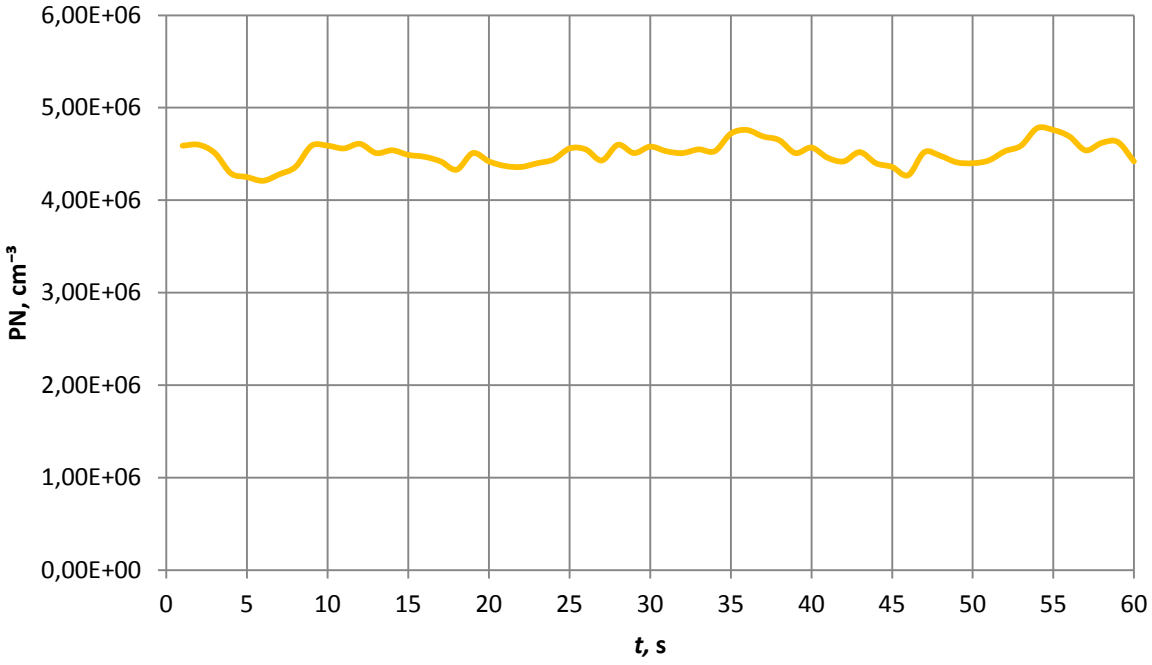
Slika 76. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 8

7.5.2.9. Radna točka 9

U radnoj točki 9 motor radi bez opterećenja pri povećanoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 9/10. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 30. U dijagramu na slici 77. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 30. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 9/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$3{,}03 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$4{,}78 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$4{,}50 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$1{,}28 \cdot 10^5$
Koeficijent varijacije (%)	2,83



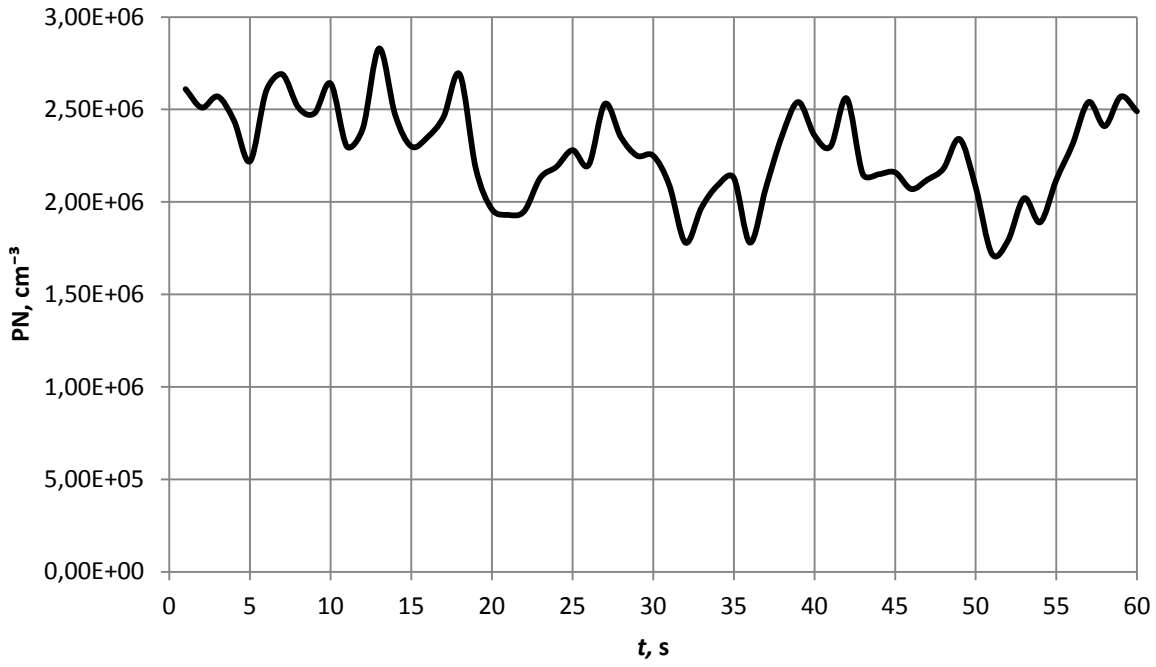
Slika 77. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 9

7.5.2.10. Radna točka 10

U radnoj točki 10 motor radi bez opterećenja pri najvećoj brzini vrtnje, simbolički označenoj s 10/10. Tijekom mjerenja u radnoj točki 10 izmjerena je najniža vrijednost emisije PN, kao i najniža srednja vrijednost. Također, tijekom ovog mjerenja najveće je odstupanje od srednje vrijednosti emisije uz standardnu devijaciju $2{,}55 \cdot 10^5$ cm^{-3} i koeficijent varijacije 11,22 %. Ukupno je vremensko trajanje mjerenja jednu minutu, a statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima prikazani su u tablici 31. U dijagramu na slici 78. prikazana je promjena vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu.

Tablica 31. Statistički podatci o izmjerenim i izračunatim vrijednostima mjerenja pri brzini vrtnje 9/10

Najniža izmjerena vrijednost emisije PN_{min} (cm^{-3})	$1{,}72 \cdot 10^6$
Najviša izmjerena vrijednost emisije PN_{max} (cm^{-3})	$2{,}83 \cdot 10^6$
Izračunata srednja vrijednost emisije PN (cm^{-3})	$2{,}27 \cdot 10^6$
Standardna devijacija (cm^{-3})	$2{,}55 \cdot 10^5$
Koeficijent varijacije (%)	11,22

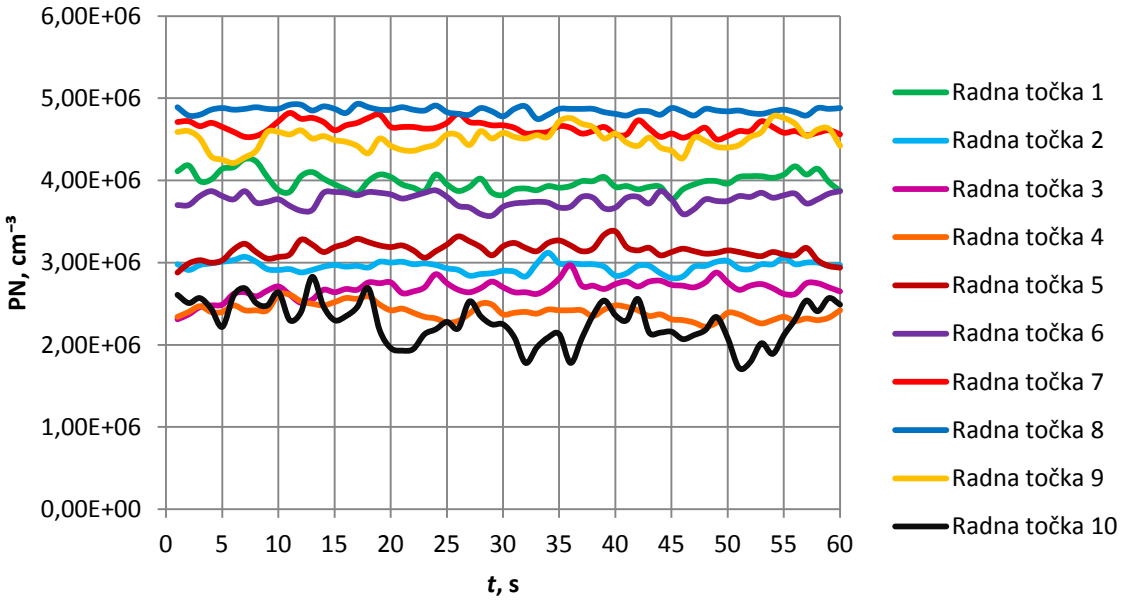


Slika 78. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u radnoj točki 10

7.6. Analiza rezultata

Budući da ispitni stroj nije opremljen DPF-om, izmjerene vrijednosti u oba režima rada uređaja veće su od granične vrijednosti od 250 000 cm^{-3} propisane pravilnikom SR 941.242. Može se zaključiti kako bi se ugradnjom i ispravnim radom DPF-a vrijednosti emisije PN trebale smanjiti za najmanje 9 – 20 puta. Naime, tolika je razlika između granične vrijednosti emisije PN i vrijednosti emisija izmjerenih tijekom ovog ispitivanja.

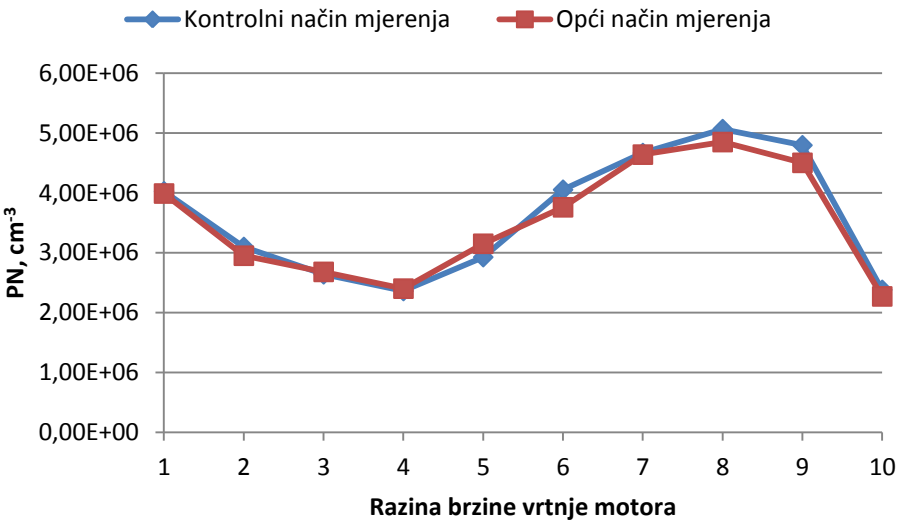
Iz rezultata ispitivanja u kontrolnom načinu rada uređaja prikazanih u tablici 21. vidljivo je da prosječne vrijednosti triju mjerenja svake radne točke ne odudaraju značajno od ukupne srednje vrijednosti iste radne točke. Najveće odstupanje srednje vrijednosti pojedinog mjerenja od ukupne srednje vrijednosti zabilježeno je u radnoj točki 10 tijekom drugog mjerenja i iznosi 7,14 %. Iz srednjih vrijednosti ne mogu se izvući zaključci o profilu emisija tijekom čitavog ispitivanja pa rezultati ispitivanja u općem načinu rada uređaja daju jasniju sliku budući da su poznate izmjerene vrijednosti emisije PN tijekom cijelog trajanja ispitivanja. Uzevši u obzir cijeli profil izmjerene emisije može se zaključiti da su pri konstantnoj brzini vrtnje izmjerene vrijednosti emisija relativno jednolikog karaktera s blagim poremećajima što potvrđuju standardne devijacije i koeficijenti varijacije. Najmanji koeficijent varijacije iznosi 0,79 % za mjerenje pri brzini vrtnje 8/10, a 90 % mjerenja ima koeficijent varijacije ≤ 4,11 %.



Slika 79. Dijagram promjene vrijednosti emisije PN u ovisnosti o vremenu tijekom mjerenja u svim radnim točkama tijekom mjerenja u općem načinu rada uređaja

Iz dijagrama na slici 79. vidljivo je da se pri najvećoj brzini vrtnje motora javljaju i najveći poremećaji u profilu emisije PN, a sukladno tome za mjerenje u radnoj točki 10 najveći je i izračunati koeficijent varijacije te iznosi 11,22 %.

Iz rezultata ispitivanja u kontrolnom načinu rada razvidno je da nema jasne veze između povećanja ili smanjenja brzine vrtnje i povećanja ili smanjenja prosječne emisije PN kroz cijeli tijek mjerenja u provedenim ispitivanjima. Isti zaključak može se izvući i iz rezultata ispitivanja u općem načinu rada uređaja, što je vidljivo i iz dijagrama na slici 80.



Slika 80. Dijagram promjene prosječne vrijednosti emisije PN u ovisnosti o brzini vrtnje motora u kontrolnom i općem načinu mjerenja

Povećanjem brzine vrtnje prosječna emisija PN najprije se postupno smanjuje do najniže vrijednosti mjerenja u kontrolnom rada ($2{,}36 \cdot 10^6$ cm^{-3}) u radnoj točki 4, odnosno druge najniže vrijednosti mjerenja u općem načinu rada ($2{,}40 \cdot 10^6$ cm^{-3}). Nakon toga slijedi ponovni porast izmjerene vrijednosti prosječne emisije do najviših vrijednosti u radnoj točki 8 ($4{,}85 \cdot 10^6$ cm^{-3} u općem režimu), u kojoj prosječna vrijednost emisije PN u kontrolnom načinu rada ($5{,}07 \cdot 10^6$ cm^{-3}) premašuje raspon mjerenja uređaja. Naposljetku se prosječna vrijednost ponovno smanjuje do druge najniže vrijednosti mjerenja ($2{,}38 \cdot 10^6$ cm^{-3}) u kontrolnom te najniže vrijednosti mjerenja ($2{,}27 \cdot 10^6$ cm^{-3}) u općem načinu mjerenja.

Tablica 32. Usporedba prosječnih vrijednosti emisija PN izmjerenih u kontrolnom i općem načinu rada uređaja

Razina brzine vrtnje motora	Kontrolni način	Opći način	Odstupanje	Odstupanje
	cm^{-3}	cm^{-3}	cm^{-3}	%
1/10	4,03E+06	3,99E+06	-3,67E+04	-0,91
2/10	3,10E+06	2,95E+06	-1,47E+05	-4,74
3/10	2,64E+06	2,68E+06	4,00E+04	1,52
4/10	2,36E+06	2,40E+06	4,00E+04	1,69
5/10	2,93E+06	3,15E+06	2,23E+05	7,63
6/10	4,05E+06	3,76E+06	-2,93E+05	-7,24
7/10	4,67E+06	4,64E+06	-2,67E+04	-0,57
8/10	5,07E+06	4,85E+06	-2,17E+05	-4,28
9/10	4,80E+06	4,50E+06	-2,94E+05	-6,12
10/10	2,38E+06	2,27E+06	-1,10E+05	-4,62

Iako su procedure provođenja mjerenja u kontrolnom i općem načinu rada uređaja u ovom ispitivanju bitno različite, moguće je načelno usporediti vrijednosti prosječne emisije PN za sve radne točke. Iz dijagrama na slici 80. te iz vrijednosti prikazanih u tablici 32. vidljivo je da su prosječne vrijednosti emisije PN oba načina rada uređaja bliske u svim radnim točkama u kojima su se provodila mjerenja. Prosječne vrijednosti emisije PN mjerenja u općem načinu uglavnom su manje od mjerenja u kontrolnom načinu rada uređaja. Odstupanja vrijednosti općeg načina mjerenja u odnosu na kontrolni kreću se između -7,24 % (radna točka 5) i 7,63 % (radna točka 6) s prosječnom vrijednosti odstupanja koja iznosi 3,93 %.

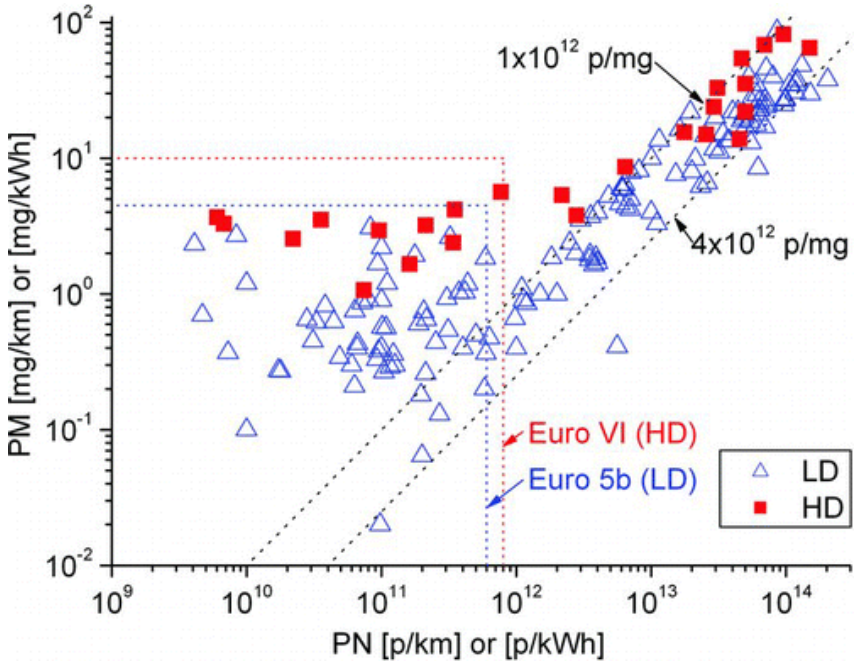
7.7. Konverzija rezultata i korelacija PN i PM

Izmjerene vrijednosti PN i izračunate prosječne vrijednosti izražene su po jedinici volumena (cm^{-3}), što proizlazi iz definicije usporedbene granične vrijednosti emisije PN prema pravilniku SR 941.242. Iz prosječnih vrijednosti emisije PN konverzijom prema izrazu (1) izračunavaju se prosječne vrijednosti emisije PN izražene po jedinici rada stroja (1/kWh). Konvertirane su prosječne vrijednosti emisije PN za sva provedena mjerenja u oba načina rada uređaja i prikazane u tablici 33.

Tablica 33. Konvertirane prosječne vrijednosti emisija PN izmjerenih u kontrolnom i općem načinu rada uređaja

Razina brzine vrtnje motora	Kontrolni način		Opći način	
	cm^{-3}	1/kWh	cm^{-3}	1/kWh
1/10	4,03E+06	1,81E+13	3,99E+06	1,80E+13
2/10	3,10E+06	1,39E+13	2,95E+06	1,33E+13
3/10	2,64E+06	1,19E+13	2,68E+06	1,21E+13
4/10	2,36E+06	1,06E+13	2,40E+06	1,08E+13
5/10	2,93E+06	1,32E+13	3,15E+06	1,42E+13
6/10	4,05E+06	1,83E+13	3,76E+06	1,69E+13
7/10	4,67E+06	2,10E+13	4,64E+06	2,09E+13
8/10	5,07E+06	2,28E+13	4,85E+06	2,18E+13
9/10	4,80E+06	2,16E+13	4,50E+06	2,03E+13
10/10	2,38E+06	1,07E+13	2,27E+06	1,02E+13

Različitim istraživanjima utvrđena je korelacija između emisija PN i PM lakih (engl. *Light-Duty*) i teških (engl. *Heavy-Duty*) gospodarskih vozila. Najbolja korelacija uočena je pri emisijama PN > $5 \cdot 10^{12}$ 1/kWh [37], a takve emisije PN ostvaruju vozila bez filtra krutih čestica. Vidljivo je iz dijagrama na slici 81. da pri nižim vrijednostima emisija PN i PM nestaje korelacija i vrijednosti su raspršene.



Slika 81. Korelacija između vrijednosti PN i PM lakih i teških gospodarskih vozila (LD – *Light-Duty*, HD – *Heavy-Duty*) [37]

Budući da je MSUI ispitnog stroja motor za teške uvjete rada bez ugrađenog filtra krutih čestica i da se izmjerene prosječne vrijednosti emisija nakon konverzije nalaze u području dobre korelacije s emisijama PM, izračunate su vrijednosti emisije PM korištenjem sljedećeg izraza:

$$PM = \frac{PN}{f_{\mathrm{k}}} \qquad \textbf{(3)}$$

gdje je:

PM – vrijednost emisije PM izražena u [g/kWh],

PN – konvertirana vrijednost emisije PN izražena u [1/kWh],

$f_{\mathrm{k}} = 2 \cdot 10^{12}$ 1/mg – faktor korelacije [37].

Uvrštavanjem konvertiranih vrijednosti emisije PN u izraz (3) izračunate su prosječne vrijednosti emisije PM obavljenih mjerenja, a rezultati su prikazani u tablici 34.

Tablica 34. Prosječne vrijednosti emisija PM u kontrolnom i općem načinu rada uređaja izračunate iz korelacije emisija PN i PM

Razina brzine vrtnje motora	Kontrolni način	Opći način
	g/kWh	g/kWh
1/10	0,0091	0,0090
2/10	0,0070	0,0066
3/10	0,0059	0,0060
4/10	0,0053	0,0054
5/10	0,0066	0,0071
6/10	0,0091	0,0085
7/10	0,0105	0,0105
8/10	0,0114	0,0109
9/10	0,0108	0,0101
10/10	0,0054	0,0051

Ispitni stroj pripada R kategoriji NCPS IV. stupnja emisija ispušnih plinova čije su granične vrijednosti emisija prikazane u tablici 20. IV. stupnjem emisija propisana je granična vrijednost emisije PM i ona iznosi 0,025 g/kWh. Prosječne vrijednosti emisija PM u oba načinu rada uređaja izračunate iz korelacije emisija PN i PM niže su pri svim brzinama vrtnje motora od granične vrijednosti, što potvrđuje da pogonski motor ispitnog stroja zadovoljava odgovarajući stupanj emisija. Prosječne vrijednosti emisija PM u oba načinu rada uređaja izračunate iz korelacije emisija PN i PM niže su pri svim brzinama vrtnje motora i od propisane granične vrijednosti PM V. stupnja emisija koja iznosi 0,015 g/kWh.

8. ZAKLJUČAK

Emisije ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem značajno utječu na okoliš i zdravlje ljudi. Da bi se smanjio negativan utjecaj motora s unutarnjim izgaranjem i motornih vozila na okolinu, granične vrijednosti emisija štetnih tvari kontinuirano se smanjuju.

Razvojem tehnologije naknadne obrade ispušnih plinova i uvođenjem sve strožih ograničenja, krute čestice postaju sve sitnije, praktički nevidljive golom oku pa se konvencionalne metode mjerenja mase krutih čestica pokazuju nedostatnima u kontroli emisija štetnih tvari.

Zbog nemogućnosti detekcije i dovoljno preciznog određivanja niskih emisija mase krutih čestica, uvedeno je mjerenje broja krutih čestica, koje omogućuje veću učinkovitost i preciznost u ispitivanju emisija krutih čestica malog promjera.

Analizator za mjerenje broja krutih čestica *TSI 3795*, koji je korišten u ovom radu, omogućuje jednostavnu provjeru ispravnosti filtra krutih čestica u kontrolnom načinu mjerenja, dok se u općem načinu mjerenja može koristi za istraživačka i razvojna mjerenja.

Usporednim mjerenjima u kontrolnom i općem načinu dobivena su dobra podudaranja rezultata na svih 10 izmjerenih radnih točaka. Provedenim vlastitim mjerenjima potvrđena je važna uloga filtra krutih čestica u smanjenju emisije broja krutih čestica. Prosječne vrijednosti emisija izmjerene prije filtra za red veličine veće su od prosječnih vrijednosti izmjerenih nakon prolaska ispušnih plinova kroz filtar. Utvrđeno je da efikasnost filtracije raste s povećanjem brzine vrtnje i opterećenja motora, a najveća izračunata efikasnost filtracije za provedena mjerenja iznosila je 98,42 %. Tijekom provedbe mjerenja s promjenjivim brzinama vrtnje motora primijećeno je da tranzijentne promjene rada motora uzrokuju poremećaje u vrijednostima izmjerenih emisija PN, a mogu dovesti i do pogrešaka u radu uređaja.

U mjerenjima provedenim pri konstantnim brzinama vrtnje motora nije utvrđena jasna veza između promjene vrijednosti izmjerene emisije PN i promjene brzine vrtnje motora. Također, pri konstantnoj brzini vrtnje izmjerene vrijednosti emisija pokazuju jednolik karakter tijekom cijelog trajanja mjerenja.

LITERATURA

[1] Ilinčić, P., Ispitivanje emisija štetnih tvari vozila u stvarnim uvjetima vožnje – nastupno predavanje, Zagreb, 2018.

[2] AQEG, Particulate Matter in the UK, Defra London, 2005.

[3] struna.ihjj.hr/naziv/aerodinamicki-promjer-cestice/8702/

[4] https://www.dieselnet.com/tech/dpm_size.php

[5] https://www.dieselnet.com/tech/measure_dpm.php

[6] DELEGIRANA UREDBA KOMISIJE (EU) 2017/654, https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2017/654/oj?locale=hr

[7] Andersson, J., Mamakos, A., Giechaskiel, B., Carriero, M., Martini, G., Particle Measurement Programme (PMP) Heavy-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE_HD), European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010. https://doi.org/10.2788/31407

[8] Bischof, O.F. Emiss. Control Sci. Technol. (2015) 1:203. https://doi.org/10.1007/s40825-015-0016-9

[9] Horiba MEXA-2000SPCS English Brochure, https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Automotive/Emission_Measurement_Systems/MEXA-2000SPCS/MEXA-2000SPCS_Brochure_English.pdf

[10] http://www.directindustry.com/prod/metso-corporation/product-9344-779929.html

[11] Schrobenhauser, R., Strzoda, R., Fleischer, M., Hartmann, A., Amann, M. C., Detection of the mass of fine particulate matter using light scattering and inertial filtering in a miniaturized sensor setup, Meas. Sci. Technol. 25 (2014) 035103. https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/3/035103

[12] Hamdi, O., Mighri, F., Rodrigue, D., Piezoelectric cellular polymer films: Fabrication, properties and applications, AIMS Materials Science, 2018, 5(5): 845-869. https://doi.org/10.3934/matersci.2018.5.845

[13] Burtscher, H., Aerosol Science 36(7) (2005) 896-932. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.12.001

[14] DELEGIRANA UREDBA KOMISIJE (EU) 2018/989, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0989

[15] Maier, T., Calibrated laboratory particle counting system and calibration procedure PEMs4Nano D2.04, European Commission, 2018.

[16] www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/cpc/index.html

[17] https://dieselnet.com/tech/measure_pm_ins.php

[18] https://www.shimadzu.com/an/powder/support/practice/p01/lesson22.html

[19] Fierz, M., Burtscher, H., Steigmeier, P., Kasper, M,, Field Measurement of Particle Size and Number Concentration with the Diffusion Size Classifier (DiSC), SAE Technical Paper 2008-01-1179, 2008. https://doi.org/10.4271/2008-01-1179

[20] https://www.avl.com/web/guest/-/apcplus-for-sub-23nm

[21] https://www.grimm-aerosol.com/products-en/nano-particle-measurement/pmp-cpc/5431/

[22] https://www.horiba.com/en_en/products/detail/action/show/Product/mexa-2000spcs-series-57/

[23] https://airmodus.com/a23-condensation-particle-counter-for-vehicle-emissions/

[24] https://www.avl.com/-/title-avl-m-o-v-e-pn-pems-is

[25] https://www.testo.com/en-US/testo-nanomet3/p/444

[26] https://www.horiba.com/en_en/products/detail/action/show/Product/obs-one-pn-unit-12/

[27] https://www.tsi.com/getmedia/a01ec52e-f39f-4312-8f9a-fded71631a69/3090_Engine_Exhaust_Particle_Sizer_A4_2980351_WEB?ext=.pdf

[28] https://www.tsi.com/products/particle-counters-and-detectors/engine-exhaust-particle-counters/nanoparticle-emission-tester-model-3795/

[29] https://www.tsi.com/getmedia/4821248b-103d-4a16-8d66-2aa474b41811/3795_Nanoparticle_Emission_Tester_A4_5001623_WEB?ext=.pdf

[30] Verordnung des EJPD über Abgasmessmittel für Verbrennungsmotoren (VAMV), 2006. https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20051389/index.html

[31] TSI NANOPARTICLE EMISSION TESTER MODEL 3795 – OPERATION AND SERVICE MANUAL, P/N 6007583, REVISION C, 2015.

[32] Richtlinie über betriebliche und technische Massnahmen zur Begrenzung der Luftschadstoff-Emissionen von Baustellen (Baurichtlinie Luft) – Ergänzte Ausgabe, 2016. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftreinhaltung-auf-baustellen.html

[33] Fleischman, R., Amiel, R., Czerwinski, J., Mayer, A., Tartakovsky, L., Performance o fin-use buses retrofitted with diesel particle filters, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol.6, no. 4, 2016, 255-272 http://www.scienpress.com/Upload/GEO/Vol%206_4_16.pdf

[34] UREDBA (EU) 2016/1628 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32016R1628

[35] https://www.liebherr.com/en/gbr/products/construction-machines/earthmoving/wheeled-excavators/details/68016.html

[36] DIREKTIVA 2004/26/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32004L0026&from=EN

[37] Giechaskiel, B., Maricq, M., Ntziachristos, L., Dardiotis, C., Wang, X., Axmann, H., Bergmann, A., Schindler, W., Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number, Journal of Aerosol Science 67 (2014) 48-86. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.09.003

PRILOZI

I. Radna uputa za mjerenje broja krutih čestica ispušnih plinova MSUI

II. CD-R disc