

## **APPENDICES**

**APPENDIX A**

**DESIGN OF PLUSE-ENERGIZED ELECTROSTATIC PRECIPITATOR AND  
HIGH VOLTAGE PULSE POWER SYPLY**

### A1. Design of Pulsed-Energized ESP

Figure A1.1 shows a diagram of the wire cylindrical ESP designed and evaluated for this work.

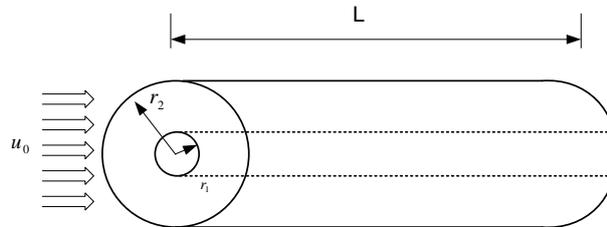


Figure A1.1 the wire-cylinder ESP configurations.

A stainless steel pipe was used as a collection electrode. It is a 500 mm length cylinder with a 90 mm inside diameter. The discharge electrode is made by tungsten wire with 0.3 mm diameter.

Table A1.1 Criteria and requirements used in the design of the wire-cylinder ESP.

Parameter	Values
Air temperature, T(K)	400
Supplied voltage negative pulse, $V_p$ (kV)	15
Collection efficiency (%)	95
Gas velocity $u_g$ (m/s)	0.5
Atmosphere Pressure	1 atm
Discharge wire electrode radius, $r_1$ (mm)	0.3
Collecting electrode pipe radius, $r_2$ (mm)	90
Collecting electrode pipe length, $L$ (mm)	500

### Calculate Capacitance of The wire-cylinder ESP

We choose a wire-cylinder ESP Capacitance of inner radius  $r_1$  and length  $L$ . A capacitance of the ESP was calculated by:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 4.8\text{pF}.$$

### Calculate migration velocity of particle

For the wire-cylinder ESP used in the present study, the inner surface area of the outer electrode of the charger is given by

$$A_c = 2\pi r_2 L = 0.1414 \text{ m}^2.$$

And the initial gas flow rate,  $Q$  can be calculated by

$$Q = u_g A = 0.5 \pi r_2^2 = 0.0032 \text{ m}^3/\text{s}.$$

The specific collection area (SCA) can be calculated by:

$$\text{SCA} = \frac{A_c}{Q} = \frac{0.1414 \text{ m}^2}{0.0032 \text{ m}^3/\text{s}} = 44.44 \text{ s/m}.$$

The migration velocity,  $u_m$  of particle was provide collection efficiency,  $\eta_t$  can be calculated by:

$$u_m = -\frac{1}{\text{SCA}} \ln(1 - \eta_t) = -\frac{1}{44.44} [\ln(1 - 0.95)] = 0.0674 \text{ m/s}$$

### Calculate pulse frequency

The peak voltage  $V_p$  gives the intensity of the corona discharge current  $I$ , and the residual voltage  $V_R$  makes the particles transport between the ESP electrodes. For negative corona, the positive ions in the active zone move back to the discharge wire; whereas the negative ions start to move towards the collecting electrode. The negative ions have mobility  $Z_i^- = 2.2 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$  (H.J. White 1963), thus a transit time,  $t_s$  of an ion between the discharge wire,  $r_1$  and the collecting electrode,  $r_2$  at a distance,  $(r_2 - r_1) \sim r_2$  can be calculated by

$$t_s = \frac{(r_2)^2}{Z_i V_p} = \frac{45 \times 10^{-3}}{2.2 \times 10^{-4} \times 15 \times 10^3} = 613.64 \mu S. \quad (\text{A.14})$$

Because of the pulse-energized ESP was designed for improving precipitation performance and prevent the occurrence of electrical breakdown so that the maximum of pulse frequency must be over ( $f \leq \frac{1}{t_p}$ ). When the pulse period,  $t_p$  is the sum of time a transit time,  $t_s$ , and pulse duration time,  $t_d$  then the pulse frequency can be calculated by

$$f \leq \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_s + t_d} = \frac{1}{613.64 \mu S + 10 \mu S} = 1.6035 \text{ kHz}.$$

We choose pulse frequency is 1 kHz.

## **A2. The design of High voltage pulsed power supply**

The pulsed power supply produced high voltage pulse according to the principle of resonant charging. The circuit diagram of the pulse power supply was shown in Figure. A2.1, the DC voltage 12 V from battery was stepped up to 15 kV by a pulse transformer with frequency range around 1 to 60 kHz. Rise time and pulse wide were 400 ns, and less than 10  $\mu$ s, respectively. Then, the high voltage AC from the pulse transformer was rectified to be DC pulse by a high voltage diode before supplying to the ESP.

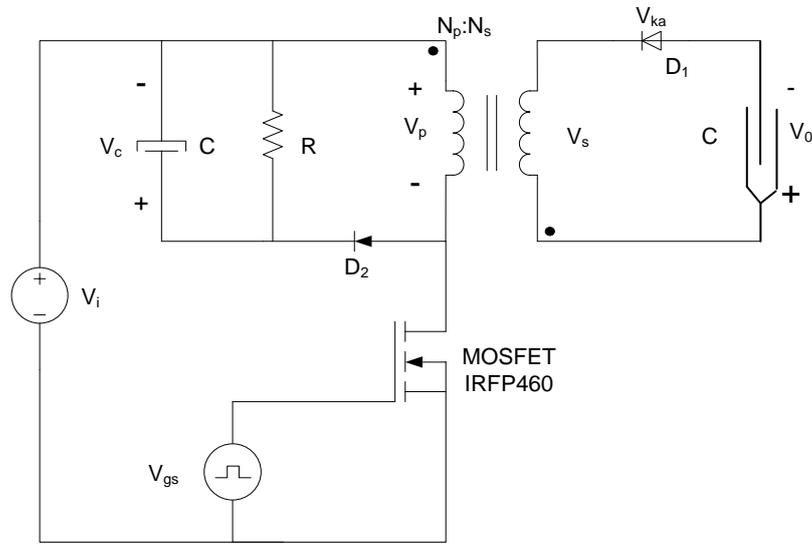


Figure A2.1 the circuit diagram of the pulse power supply.

**Table A2.1 Design parameter**

Parameter	Description
Capacitance of ESP	4.8pF
Output voltage( $V_o$ )	15,000 V <sub>p</sub>
Charging time	1/60 sec
Maximum frequency	60 kHz
Pulse duration( $\Delta t$ )	<10 $\mu$ s
Input voltage( $V_p$ )	12 VDC

From the values are defined in the table. The first step is to determine the energy required to charge the ESP with capacitance  $C$  under the voltage  $V_o$ :

$$W_s = \frac{C V_o^2}{2} = \frac{4.8 \times 10^{-12} \times 15,000^2}{2} = 0.54863 \text{ mJ},$$

Where  $W_s$  is energy in Joules,  $V_o$  and  $C$  is the output voltage and ESP capacitance, respectively

The next step is to find the number of charging pulses ( $N$ ), in the stated time:

$$N = 0.00167 \text{ s} \times 60,000 \frac{\text{pulses}}{\text{s}} = 100.$$

The next step, the energy per charging pulse ( $W_p$ ) can be calculate:

$$W_p = \frac{0.54863 \text{ mJ}}{100} = 5.4863 \mu\text{J/pulse}$$

The fourth step is to make an estimation of loss factor. The losses must be included in the power supplied from the source. Use the energy required to charge the ESP to find the efficiency value from Figure 1

$$\text{Energy from source} = \frac{W_p}{\text{Efficiency}}$$

$$\text{Energy from source} = \frac{5.4863 \mu\text{J}}{0.80} = 7.3151 \mu\text{J/pulse}$$

The final step, solve for the transformer primary current and inductance from two equations:

$$L = \frac{V_p \Delta t}{I_p}, \text{ and } W = \frac{1}{2} L I_p^2 \rightarrow L = \frac{2W}{I_p^2}$$

$$\frac{V_p \Delta t}{I_p} = \frac{2W}{I_p^2}, I_p = \frac{2W}{V_p \Delta t}$$

$$I_p = \frac{2 \times 7.3151 \times 10^{-6}}{12 \times 10 \times 10^{-6}} = 122 \text{ mA}$$

A primary inductance of the transformer can be calculate by substituting the value of  $I_p$  in  $L = \frac{V_p \Delta t}{I_p}$

$$L = \frac{12 \times 10 \times 10^{-6}}{122 \times 10^{-3}} = 0.98 \text{ mH}$$

Knowing the primary inductance and the peak current, the design of the transformer can proceed.

Select the core material, using guidance from the manufacturer's data sheet in A.3.

#### **Transformer core:**

Core type, Family: UR core: UR64/40/20-3F3

Core Size :  $A_c = 2.90 \text{ cm}^2$

Core Length  $l_c = 2 \times D = 2 \times 2.65 \text{ cm} = 5.3 \text{ cm} \sim 5 \text{ cm}$

Core Material: Soft Ferrite 3F3,  $\mu = 1800$

Calculate the number of primary turns that will provide the desired inductance value:

$$N_p = \sqrt{\frac{L l_c}{\mu_0 \mu_c A_c}} = \sqrt{\frac{980 \mu\text{H} \cdot 5 \text{ cm}}{4\pi \times 10^{-3} \cdot 1800 \cdot 2.9 \text{ cm}^2}} \times 10^{-2} = 9 \text{ Turn}$$

Calculate the number of secondary turns that will provide the desired output voltage value:

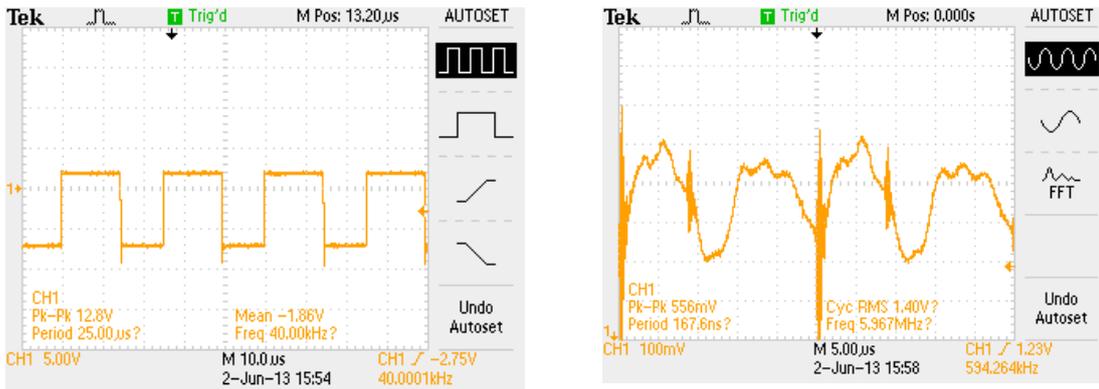
$$N_s = \frac{V_o}{V_p} N_p = \frac{15 \times 10^3}{12} 9 = 1,082 \text{ Turn}$$

A pulse transformer coil was wound with the following design data:

Primary: 9 turns of #28 AWG

Secondary: 1,082 turns of #40 AWG

The transistor selected for this design is International IRFP460 which has detail in Appendix D4.



(a)

(b)

Figure A2.2 (a) Gate drive signal and (b) output voltage wave form measured by oscilloscope Tektronix TDS 2014C

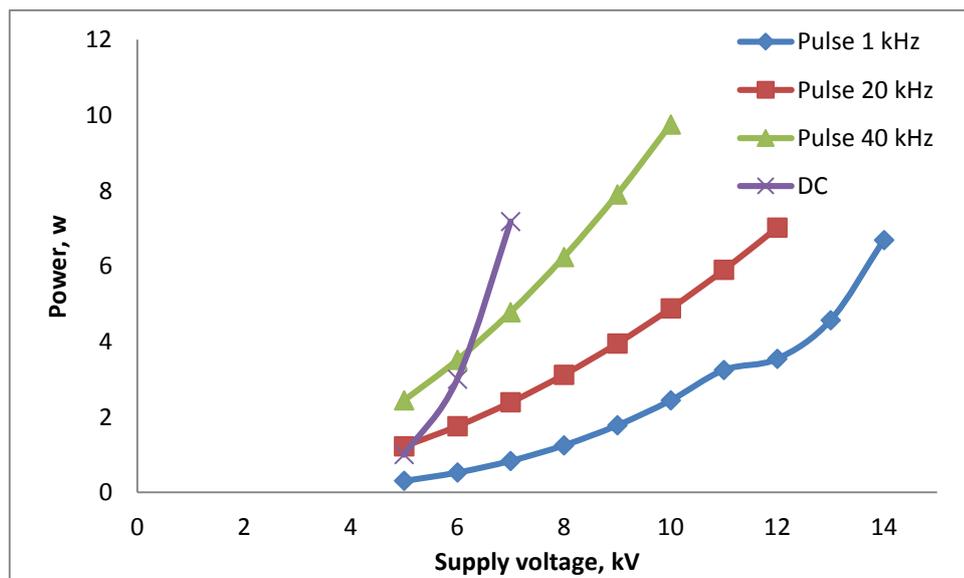


Figure A2.3 Output power measured by oscilloscope Tektronix TDS 2014C

**APPENDIX B**

**COMPUTER PROGRAMING FOR ESTIMATE MIGRATION VELOCITY  
AND COLLECTION EFFICIENCY OF ESP**

## B1. Computer programming for estimate *migration velocity calculation*

### Input

**Vmax** = Pulse peak voltage in kV  
**td** = pulse wide in s  
**freq** = pulse frequency in Hz  
**d** = diameter of particle in micrometer  
**Vair** = gas flow velocity m/s

### Output

**Vte**= Migration velocity of particle size d

```

function [ Vte ] = migration( Vmax,td,freq,d,Vair )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

%Wire-cylindrical ESP parameter
rw= 0.003;% in cm
r_out=4.5;% in cm
L=50 ;% in cm
t=35 ;% in degree cencies
p=1;

ton=td;

%physic constance
charg_e = 1.6e-19; %in C
epselon = 8.854e-12; %in F/m
KB=1.38e-23; %in J/K
Zi= 1.6e-4; % The ion mobility2.2e-4 for negative ion
Die_const=3;
particle_density=2.25*3; %in kg/m3

% unit convection cm to m
r2=r_out*1e-2;% in m
r1=rw*1e-2;
Length =50*1e-2 ;% in m
KE=1/(4*pi*epselon);
area=2*pi*(r2)*Length;%in m2
E=(Vmax*1e3)/(r2);%in V/m
Pr=101325;
P=p*101325;
Tr=293;
T=273+t;
P_ratio=1;

Air_constant=(P/Pr)*(Tr/T);

%Electric field near collecting electrode
Vdc = Vmax*td*freq;
Edc=(Vdc*1e3)/(r2*log(r2/r1));

particle_mass=(pi*(d^3)*particle_density)/6;
% ci=sqrt(8*KB*T)/(pi*particle_mass);
ci=500; % ion thermalvelocity in m/s

%Charg Calculatoin ni_t
I=currentcylinder(Vmax,rw,r_out,L,Air_constant);
Ni=I/(2*pi*Length*charg_e*Zi*Vmax);
charg_t=(Length/Vair)*(P/Pr);
  
```

```

%particle Charging Calculatoin
nf1=1+(2*(Die_const-1)/(Die_const+2));
nf2=(E*d^2)/(4*KE);
mem=(pi*KE*charg_e*Zi*Ni*charg_t);
nf3= mem / (1+mem);
Qfield=nf1*nf2*nf3;

ndif1=(d*KB*T)/(2*KE*charg_e);
ndif2=1+(pi*KE*d*ci*(charg_e^2)*Ni*charg_t)/(2*KB*T);

Qdif=ndif1*log(ndif2);
q=Qdif+Qfield;

%calcalation air viscosity and air mean free path at temperature t and
%pressure p (atm)
air_viscosity_20=1.185e-5;
air_free_path_20= 0.0665e-6;
air_viscosity = air_viscosity_20*((Tr+110)/(T+110))*((T)/Tr);%in Pa s
air_free_path = air_free_path_20*((1+110/Tr)/(1+110/(T)))/Air_constant;
%calculation conninghame slip factor
Kn=2*air_free_path/d;

Cc = 1+Kn*(1.257+0.4*exp(-1.1/Kn));

Vte=(q*Edc*Cc)/(3*pi*air_viscosity*d);

end

```

## B2. Computer programing for estimate *pulse corona current calculation*

### **Input**

**V** = Pulse peak voltage in kV  
**rw** = radius of discharge electrode wire in cm  
**r\_out** = radius of collecting electrode wire in cm  
**L** = effective length of ESP in cm  
**Air\_constant** = relative air constant

### **Output**

**I**= corona current in ampere

### Matlab source code

```

function [I] = currentcylinder(V,rw,r_out,L,Air_constant )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
%V in kV
% Detailed explanation goes here
%define constant
epselon = 8.854e-12; %permittivity of free space
Zi= 1.6e-4; % The ion mobility2.2e-4 for negative ion

%convert kV cm to si unit
r2=r_out*1e-2;
r1=rw*1e-2;
Vp=V*1e3;
%compute corona inception voltage

[E_corona V_corona]= cylindercorona( rw,r_out,Air_constant );
delta_V = (V - V_corona)*1e3;

```

```

if delta_V <= 0
    I1=0;
else
    a= 8*pi*(L*1e-2)*epselon*Zi;
    b= ((r2)^2)*log(r2/r1);
    %b= r2^2;
    %I1 = (a/b)*Vp*delta_V;
    I1=((52e-4)*V*(V-V_corona))/(4*r_out^2);
    %Ic=450e-9*delta_V^2;
    %I1=10;
end
I=I1;
end

```

#### ***The onset Voltage and Electric field calculation***

```

function [ EC VC ] = cylindercorona( rw,r_out,relativ_air )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes hereet
% rw,r_out in cm
% EC in kV/cm and VC in kV
standard = relativ_air ;
% for negative
K_positive_dc = 0.308;
E_spark_positive = 31;

%K_positive_dc = 0.24;
%E_spark_positive = 33.7;

EC = (E_spark_positive*standard)*(1+(K_positive_dc/(sqrt(standard*rw))));

VC = (EC*rw)*log(r_out/rw);
end

```

### **B3. Computer programing for estimate *total collection efficiency***

#### ***Input***

**Size\_max** = maximum size of particle in micrometer  
**concent** = particle concentration in particle/cm<sup>3</sup>  
**unit** = unit of particle diameter, such as 1e-6 is in micrometer  
**Vapply** = pulse peak voltage in kV  
**Vair** = gas flow velocity in m/s

#### ***Output***

**Mass\_eff** = total mass collection efficiency  
**Num\_ber\_eff** = total number collection efficiency

### **Matlab source code**

```

function [mass_eff number_eff] =
total_efficiency( Size_max,concent,unit,Vapply,Vair)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
step=1;
Vmax=Size_max;

Volt=Vapply;

```

```

freq=20e3;
td=100e-6;

%Wire-cylindrical ESP parameter
GMD=1.73;
GMS=5.03;
%concent=1;
sum=0.0;
sum_mass_in=0.0;
sum_num_in=0.0;
sum_num_out=0.0;
sum_mass=0.0;
sum_mass_out=0.0;
mass_con=2.25e6;
numrang=[0,0];
%xa=1:res;
%Volt=7;
%Q=0.0013;% air velocity 1.02 m/s
V=0;
for x=1:step:Vmax
    V=V+1;
    Nd=lognormaldist (concent,GMS,GMD,x);
    d=x*unit;
    Ix(V)=Nd;
    xc(V)=x;
    md_in(V)=(pi/6)*(d^3)*mass_con*Nd;
    sum_mass_in = sum_mass_in + md_in(V);
    savesum_mass_in(V)=sum_mass_in;
    sum_num_in =sum_num_in+Ix(V);
    savesum_num_in(V)=sum_num_in;

    %calculate out put by eff
    eff = efficiency (Volt,td,freq,d,Vair);
    yc(V)=eff*100;
    Number_out = (1-eff)*Nd;
    md_out=(pi/6)*(d^3)*mass_con*Number_out;
    Yx(V)=Number_out;
    sum_num_out=sum_num_out+Number_out;
    savesum_num_out(V)=sum_num_out;
    sum_mass_out=sum_mass_out+md_out;
    savesum_mass_out(V)= sum_mass_out;

end

mass_eff=1-sum_mass_out/sum_mass_in
number_eff=1-sum_num_out/sum_num_in

```

```
end
```

**Function for get particle number form lognormal distribution curve**

```

function [ particle_number ] = lognormaldist( concent,gom_size,gom_std,d )
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

aa= concent/(d*sqrt(2*pi)*log(gom_std));

bb=(log(d/gom_size)^2)/(2*(log(gom_std))^2);

particle_number= aa*exp(-bb);

```

end

```
Function for estimate fractional collection efficiency  
function [ colf ] = efficiency(Vmax,td,freq,d,Vair)  
%UNTITLED2 Summary of this function goes here  
% Detailed explanation goes here  
Length =50*1e-2 ;% in m  
r_out=4.5;% in cm  
r2=r_out*1e-2;% in m  
  
Length =50*1e-2 ;% in m  
  
area=pi*(r2);%in m2  
Vte = migration( Vmax,td,freq,d,Vair);  
%calculation collection efficiency  
De =(Vte*2*Length)/(Vair*r2);  
colf=1-exp(-De);  
  
end
```

**APPENDIX C**  
**DATA SHEETS**

## C1. Ferrite Core

### Ferrite Cores

UR, URS Series

For Audio-Visual, TV, & Radio Equipment  
For Flyback Transformer

#### MATERIAL CHARACTERISTICS

Material			HV22	HV45	
Initial permeability*	$\mu_i$	1800		2300	
Core loss*	$P_{cm}$	W/kg	[16kHz, 150mT, 100°C]	3.8	3
			[60kHz, 200mT, 100°C]	55	40
			[100kHz, 200mT, 100°C]	105	90
Saturation magnetic flux density* [H = 1194A/m]	$B_s$	mT	[23°C]	510	500
			[100°C]	410	380
Remanent flux density*	$B_r$	mT	170	130	
Coercive force*	$H_c$	A/m	16	14	
Curie temperature	$T_c$	°C min.	200	200	
Electrical resistivity*	$\rho_v$	$\Omega\cdot m$	3	3	
Density*	$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	$4.8 \times 10^3$	$4.8 \times 10^3$	
Thermal expansion coefficient*	$\alpha$	ppm/°C	12	12	

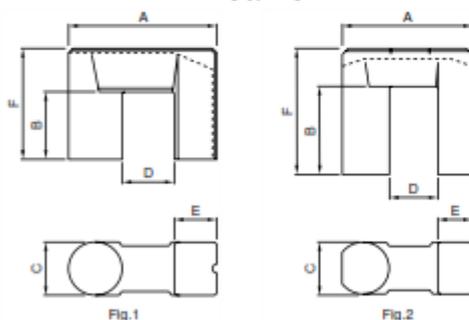
\*Average value

\* The values were obtained with toroidal cores at room temperature unless otherwise shown.

\* 1(mT): 10(gauss), 1(A/m): 0.012566(Oersted)

#### UR SERIES

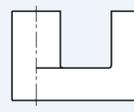
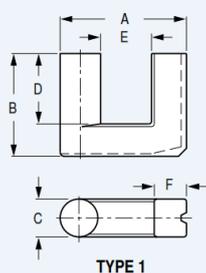
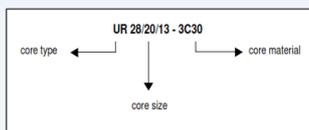
##### SHAPES AND DIMENSIONS [Typical]



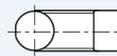
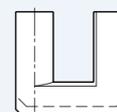
Type	Fig.	Dimensions (mm)						$A_e$ (mm <sup>2</sup> )	$l_e$ (mm)
		A	B	C	D min.	E	F		
UR30.4DM	1	30.4	21.6	10	11.7	8.15	30	77.7	138.3
UR34DA	1	34.7	17.5	12.5	12.1	9.6	27.1	118.3	127.6
UR36HK	2	35.05	24	12.7	13.05	9.3	34.3	118.5	155.5
UR37DA	1	37.2	20.1	13	13.2	10.5	30.6	130.9	142.7
UR39DA	1	38.9	25	14	12.95	11.3	36	150	164.3
UR40SL	1	40	18.4	14	14	11.5	30.2	153.4	141.1
UR40DA	1	40.05	20.1	14.5	13.45	11.5	31.1	158.5	146.2
UR41DA	1	41.6	25	15	14.2	11.8	37	171.6	169.5
UR43DA	1	43.4	25	16.5	13.5	12.8	38	205.2	171.6
UR46DB	1	45.75	25	17.5	14.65	13	38	223.3	174.9

## UR cores

This type is suitable for Line Output Transformers (LOT) in TV-sets. The round leg allows easy winding, also of strip conductors. Because of the high voltages involved, the round shape helps to prevent corona effect.



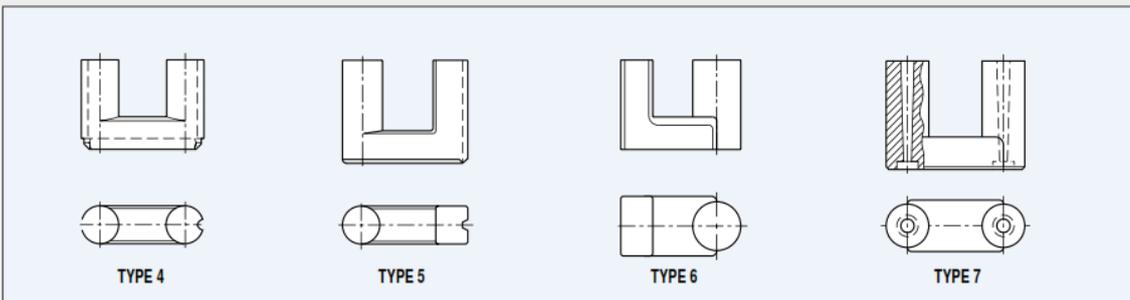
TYPE 2



TYPE 3

Core type	shape	dimensions (mm)						effective core parameters				
		A	B	C	D	$E_{min}$	F	core factor $\Sigma l/A$ ( $mm^{-1}$ )	eff. volume $V_{e_3}$ ( $mm^3$ )	eff. length $l_e$ (mm)	eff. area $A_{e_2}$ ( $mm^2$ )	mass of core half (g)
UR28/20/14	6	28.3	20.4	11.2	13.0	8.5	7.5	0.990	9460	97	98	25
UR35/28/13	5	35.2	28.3	12.7	18.8	13.1	9.3	1.100	15900	132	120	42
UR39/35/15	3	38.7	35.2	14.9	24.8	15.0	9.1	1.094	24300	163	149	64
UR42/21/12	4	41.8	20.6	11.9	11.1	18.2	11.9	1.09	11800	113	104	31
UR42/32/15	5	42.5	31.8	15.2	20.2	14.4	12.0	0.832	26670	149	179	69
UR43/34/16	2	42.1	34.0	15.8	24.0	15.7	9.6	0.982	27100	163	166	71
UR44/36/15	1	43.8	35.9	14.65	24.45	16.65	11.8	1.006	28700	170	169	71
UR47/36/16	5	47.55	35.7	15.95	23.8	18.25	12.6	0.900	33800	174	194	86
UR48/39/17	5	48.0	39.4	17.0	26.4	17.4	13.0	0.865	39990	186	215	99
UR64/29/14	4	64.0	29.5	13.8	18.1	36.1	13.8	1.26	27000	185	147	71
UR64/40/20	7	64.0	40.5	20.0	26.5	23.2	20.0	0.726	61000	210	290	160

**UR cores**



shape	product range			
	3C81 / 3F3	3C15	3C30 des	3C34 prot
6	-	-	UR28/20/13 - 3C30	-
5	-	UR35/28/13 - 3C15	UR35/28/13 - 3C30	-
3	-	UR39/35/15 - 3C15	UR39/35/15 - 3C30	-
4	UR42/21/12 - 3C81	-	-	-
5	-	UR42/32/15 - 3C15	UR42/32/15 - 3C30	-
2	-	UR43/34/16 - 3C15	UR43/34/16 - 3C30	-
1	-	UR44/36/15 - 3C15	UR44/36/15 - 3C30	-
5	-	UR47/36/16 - 3C15	UR47/36/16 - 3C30	-
5	-	UR48/39/17 - 3C15	UR48/39/17 - 3C30	-
4	UR64/29/14 - 3C81	-	-	-
7	-	-	-	-
7	UR64/40/20 - 3F3	-	-	-

## Soft Ferrites

## Material grade survey

## MATERIAL GRADE SURVEY

## Ferrite material grade survey

FERRITE MATERIAL	$\mu_i$ AT 25 °C	$B_{sat}$ (MT) at 25 °C (3000 A/M)	$T_C$ (°C)	$\rho$ ( $\Omega m$ )	FERRITE TYPE	MAIN APPLICATION AREA	AVAILABLE CORE SHAPES		
4C6	100	$\approx 400$	$\geq 350$	$\approx 10^9$	NiZn	telecom filters signal transformers pulse transformers delay lines	RM, P, PT, PTS, EP, E, ER, ring cores (toroids)		
3D3	750	$\approx 400$	$\geq 200$	$\approx 2$	MnZn				
3B7	2300	$\approx 450$	$\geq 170$	$\approx 1$	MnZn				
3H1	2300	$\approx 400$	$\geq 130$	$\approx 1$	MnZn				
3H3	2000	$\approx 400$	$\geq 160$	$\approx 2$	MnZn				
3E1	3800	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn				
3E4	4700	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn				
3E5	10000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 0.5$	MnZn				
3E6	12000	$\approx 400$	$\geq 130$	$\approx 0.1$	MnZn				
3E7	15000	$\approx 400$	$\geq 130$	$\approx 0.1$	MnZn				
3E25	6000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 0.5$	MnZn				
3E27	6000	$\approx 480$	$\geq 175$	$\approx 0.5$	MnZn				
3B8	2300	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 1$	MnZn			power conversion general purpose transformers	E, Planar E, EC, EFD, EP, ETD, ER, U, UR, I, RM/I, RM/ILP, P/I, PT, PTS, PQ, ring cores (toroids)
3C15	1800	$\approx 500$	$\geq 190$	$\approx 1$	MnZn				
3C30	1800	$\approx 500$	$\geq 220$	$\approx 2$	MnZn				
3C81	2700	$\approx 450$	$\geq 210$	$\approx 1$	MnZn				
3C85	2000	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 2$	MnZn				
3C90	2000	$\approx 450$	$\geq 220$	$\approx 5$	MnZn				
3C94	2300	$\approx 450$	$\geq 220$	$\approx 5$	MnZn				
3F3	1800	$\approx 450$	$\geq 200$	$\approx 2$	MnZn				
3F4	900	$\approx 450$	$\geq 220$	$\approx 10$	MnZn				
3F35	1400	$\approx 500$	$\geq 240$	$\approx 5$	MnZn				
4F1	80	$\approx 350$	$\geq 260$	$\approx 10^9$	NiZn				
3S1	4000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn	suppression	EMI beads, beads on wire, SMD beads, common-mode chokes, cable shields, rods, ring cores (toroids), wideband chokes		
3S3	350	$\approx 350$	$\geq 225$	$\approx 10^4$	MnZn				
3S4	1700	$\approx 350$	$\geq 110$	$\approx 10^3$	MnZn				
4S2	700	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 10^9$	NiZn				
4C65	125	$\approx 400$	$\geq 350$	$\approx 10^9$	NiZn				
4A11	700	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 10^9$	NiZn				
4A15	1200	$\approx 350$	$\geq 125$	$\approx 10^9$	NiZn				
3C11	4300	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 1$	MnZn				
3E25	6000	$\approx 400$	$\geq 125$	$\approx 0.5$	MnZn				
3C2	700	$\approx 400$	$\geq 150$	$\approx 0.1$	MnZn			deflection coils	yoke rings
2A2	350	$\approx 250$	$\geq 135$	$\approx 10^6$	MgZn				
2A3	300	$\approx 270$	$\geq 175$	$\approx 10^6$	MgZn				
2B1	350	$\approx 250$	$\geq 125$	$\approx 10^6$	MgZn				

## Soft Ferrites

FERRITE MATERIAL	$\mu_i$ AT 25 °C	$B_{sat}$ (MT) at 25 °C (3000 A/M)	$T_c$ (°C)	$\rho$ ( $\Omega m$ )	FERRITE TYPE	MAIN APPLICATION AREA	AVAILABLE CORE SHAPES
4E1	15	$\approx 200$	$\geq 500$	$\approx 10^5$	NiZn	tuning suppression	rods, tubes, wideband chokes
4D2	60	$\approx 240$	$\geq 400$	$\approx 10^5$	NiZn		
4B1	250	$\approx 350$	$\geq 250$	$\approx 10^5$	NiZn		
3B1	900	$\approx 400$	$\geq 150$	$\approx 0.2$	MnZn	magnetic regulators	ring cores (toroids)
3R1	800	$\approx 450$	$\geq 230$	$\approx 10^3$	MnZn		

## Iron powder material grade survey

IRON POWDER MATERIAL	$\mu_i$ AT 25 °C	$B_{sat}$ (MT) at 25 °C (3000 A/M)	MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE (°C)	MAIN APPLICATION AREA	AVAILABLE CORE SHAPES
2P40	40	950	140	suppression	ring cores (toroids)
2P50	50	1000	140		
2P65	65	1150	140		
2P80	80	1400	140		
2P90	90	1600	140		

## Typical mechanical and thermal properties

PROPERTY	MnZn FERRITE	NiZn FERRITE	UNIT
Young's modulus	$(90 \text{ to } 150) \times 10^3$	$(80 \text{ to } 150) \times 10^3$	N/mm <sup>2</sup>
Ultimate compressive strength	200 to 600	200 to 700	N/mm <sup>2</sup>
Ultimate tensile strength	20 to 65	30 to 60	N/mm <sup>2</sup>
Vickers hardness	600 to 700	800 to 900	N/mm <sup>2</sup>
Linear expansion coefficient	$(10 \text{ to } 12) \times 10^{-6}$	$(7 \text{ to } 8) \times 10^{-6}$	K <sup>-1</sup>
Specific heat	700 to 800	750	J.kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Heat conductivity	$(3.5 \text{ to } 5.0) \times 10^{-3}$	$(3.5 \text{ to } 5.0) \times 10^{-3}$	J.mm <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>

## C2. Copper Wire Table

### AWG Wire Sizes (see table below)

AWG: In the American Wire Gauge (AWG), diameters can be calculated by applying the formula  $D(\text{AWG}) = .00592^{((36-\text{AWG})/39)}$  inch. For the 00, 000, 0000 etc. gauges you use -1, -2, -3, which makes more sense mathematically than "double nought." This means that in American wire gage every 6 gauge decrease gives a doubling of the wire diameter, and every 3 gauge decrease doubles the wire cross sectional area. Similar to dB in signal and power levels.

### Metric Wire Gauges (see table below)

Metric Gauge: In the Metric Gauge scale, the gauge is 10 times the diameter in millimeters, so a 50 gauge metric wire would be 5 mm in diameter. Note that in AWG the diameter goes up as the gauge goes down, but for metric gauges it is the opposite. Probably because of this confusion, most of the time metric sized wire is specified in millimeters rather than metric gauges.

### Load Carrying Capacities (see table below)

The following chart is a guideline of ampacity or copper wire current carrying capacity following the *Handbook of Electronic Tables and Formulas* for American Wire Gauge. As you might guess, the rated ampacities are just a rule of thumb. In careful engineering the voltage drop, insulation temperature limit, thickness, thermal conductivity, and air convection and temperature should all be taken into account. The Maximum Amps for Power Transmission uses the 700 circular mils per amp rule, which is very very conservative. The Maximum Amps for Chassis Wiring is also a conservative rating, but is meant for wiring in air, and not in a bundle. For short lengths of wire, such as is used in battery packs you should trade off the resistance and load with size, weight, and flexibility.

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
0000	0.46	11.684	0.049	0.16072	380	302	125 Hz
000	0.4096	10.40384	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz
00	0.3648	9.26592	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz
0	0.3249	8.25246	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	0.197	0.64616	158	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz

19	0.0359	0.91186	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	40.81	133.8568	2.2	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	51.47	168.8216	1.7	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	64.9	212.872	1.4	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	81.83	268.4024	1.2	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	103.2	338.496	0.86	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	130.1	426.728	0.7	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	164.1	538.248	0.53	0.091	430 kHz
Metric 2.0	0.00787	0.200	169.39	555.61	0.51	0.088	440 kHz
33	0.0071	0.18034	206.9	678.632	0.43	0.072	540 kHz
Metric 1.8	0.00709	0.180	207.5	680.55	0.43	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz
Metric 1.6	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	329	1079.12	0.27	0.044	870 kHz
Metric 1.4	.00551	.140	339	1114	0.26	0.043	900 kHz
36	0.005	0.127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz
Metric 1.25	.00492	0.125	428.2	1404	0.20	0.034	1150 kHz
37	0.0045	0.1143	523.1	1715	0.17	0.0289	1350 kHz
Metric 1.12	.00441	0.112	533.8	1750	0.163	0.0277	1400 kHz
38	0.004	0.1016	659.6	2163	0.13	0.0228	1750 kHz
Metric 1	.00394	0.1000	670.2	2198	0.126	0.0225	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	831.8	2728	0.11	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	1049	3440	0.09	0.0137	2900 kHz

Sq. mm	Sq. in.	Cir. mils	AWG
1000	1.550	1974000	
975	1.511	1924700	
950	1.472	1875300	
925	1.434	1826000	
900	1.395	1776600	
875	1.356	1727300	
850	1.317	1677900	
825	1.279	1628600	
800	1.240	1579200	
775	1.201	1529900	
750	1.163	1480500	
725	1.124	1431200	
700	1.085	1381800	
675	1.046	1332500	
650	1.008	1283100	
625	.969	1233800	
600	.930	1184400	
575	.891	1135100	
550	.853	1085700	
525	.814	1036400	
500	.775	987000	
475	.736	937700	
450	.698	888300	
425	.659	839000	
400	.620	789600	
375	.581	740300	
350	.542	690900	
325	.504	641600	
300	.465	592200	
275	.426	542900	
250	.388	493500	
225	.349	444200	
200	.310	394800	
175	.271	345500	
150	.233	296100	
125	.1938	246800	
—	—	211600	4/0
100	.1550	197400	
95	.1472	187530	
90	.1395	177660	
—	—	167800	3/0
85	.1317	167790	
80	.1240	157920	
75	.1163	148050	
70	.1085	138180	
—	—	133100	2/0
65	.1008	128310	
60	.0930	118440	

Sq. mm	Sq. in.	Cir. mils	AWG
55	.0853	108570	
—	—	105600	1/0
50	.0775	98700	
45	.0698	88830	
—	—	83690	1
40	.0620	78960	
35	.0542	69090	
—	—	66360	2
30	.0465	59220	
—	—	52620	3
25	.0388	49350	
—	—	41740	4
20.0	.0310	39480	
19.5	.0302	38490	
19.0	.0294	37510	
18.5	.0287	36520	
18.0	.0279	35530	
17.5	.0271	34550	
17.0	.0264	33560	
—	—	33090	5
16.5	.0256	32560	
16.0	.0248	31580	
15.5	.0240	30600	
15.0	.0233	29610	
14.5	.0225	28620	
14.0	.0217	27640	
13.5	.0209	26650	
—	—	26420	6
13.0	.0201	25660	
12.5	.0194	24680	
12.0	.0186	23690	
11.5	.0178	22700	
11.0	.0171	21710	
—	—	20820	7
10.5	.0163	20730	
10.0	.0155	19740	
9.5	.01472	18753	
9.0	.01395	17766	
8.5	.01317	16779	
—	—	16510	8
8.0	.01240	15792	
7.5	.01163	14805	
7.0	.01085	13818	
—	—	13090	9
6.5	.01008	12831	
6.0	.00930	11844	
5.5	.00853	10857	
—	—	10380	10

Sq. mm	Sq. in.	Cir. mils	AWG
5.00	.00775	9870	
4.75	.00736	9377	
4.50	.00698	8883	
4.25	.00659	8390	
—	—	8230	11
4.00	.00620	7896	
3.75	.00581	7403	
3.50	.00542	6909	
—	—	6530	12
3.25	.00504	6416	
3.00	.00465	5922	
2.75	.00426	5429	
—	—	5180	13
2.50	.00388	4935	
2.25	.00349	4422	
—	—	4110	14
2.00	.00310	3948	
1.75	.00271	3455	
—	—	3260	15
1.50	.00233	2961	
—	—	2580	16
1.25	.00194	2468	
—	—	2050	17
1.00	.00155	1974	
.90	.00140	1777	
—	—	1620	18
.80	.00124	1579	
.75	.00116	1481	
.70	.00109	1382	
—	—	1290	19
.60	.00093	1184	
—	—	1029	20
.50	.000775	987	

### C3. Typical Characteristic of Popular insulation

#### EPDM

EPDM (ethylene-propylene-diene elastomer) is a chemically cross-linked elastomer with excellent flexibility at high and low temperatures (150° to -55°C). It has good insulation resistance and dielectric strength, as well as excellent abrasion resistance and mechanical properties. EPDM also has better cut-through resistance than Silicone rubber, which it replaces in some applications.

EPDM is compatible with most varnishes, but after the dip and bake cycle varnish tends to adhere to the insulation (because EPDM, unlike some rubber insulations, does not exude oils or waxes). As lead wires are pulled apart for termination, the varnish cracks, sometimes breaking the insulation.

To resolve this problem, a stearic solution is applied to the lead wire during the put-up process. This ensures that rigid varnish does not cause EPDM insulation to rupture when the wire is terminated.

Field evaluations by numerous users reveal that the coated EPDM has excellent varnish resistance at least equal to synthetic elastomers, cross-link polyethylene, or Silicone glass braid in dip and bake systems.

#### Fiamarrest®

Fiamarrest is a plenum grade chloride-based jacketing material with low smoke and low flame spread properties. Cables jacketed with Fiamarrest meet the ANSI/NFPA Standard 262-1985 (UL910), Plenum Cable Flame Test.

#### Halar®

Thermoplastic fluoropolymer material with excellent chemical resistance, electrical properties, thermal characteristics, and impact resistance. The temperature rating is -70°C to 150°C.

#### Neoprene

The temperature range of this material can vary from -55°C to 90°C. The actual range would depend on the formulation used. Neoprene is both oil-resistant and sunlight-resistant, making it ideal for many outdoor applications. The most stable colors are Black, Dark Brown, and Gray. The electrical properties are not as good as other insulation materials. Because of this, thicker insulation should be used. Typical designs where this material is used are lead wire insulation and cable jackets.

#### Polyethylene (Solid and Foamed)

A very good insulation in terms of electrical properties. Low dielectric constant, a stable dielectric constant over all frequencies, very high insulation resistance. In terms of flexibility, polyethylene can be rated stiff to very hard, depending on molecular weight and density—low density being the most flexible, with high-density, high-molecular weight formulation being very hard. Moisture resistance is rated excellent. Black and specially formulated colored versions have excellent weather resistance. The dielectric constant is 2.3 for solid insulation and typically 1.64 for foam designs. Flame retardant formulations are available with dielectric constants ranging from about 1.7 for foam flame retardant to 2.58 for solid flame retardant polyethylene.

#### Polypropylene (Solid and Foam)

Similar in electrical properties to polyethylene. This material is primarily used as an insulation material. Typically, it is harder than polyethylene. This makes it suitable for thin wall insulations. UL maximum temperature rating may be 60°C, 80°C or 105°C. The dielectric constant is 2.25 for solid and typically 1.55 for foam designs.

#### Polyurethane

This material is used primarily as a cable jacket material. It has excellent oxidation, oil, and ozone resistance. Some formations also have good flame resistance. It is a hard material with excellent abrasion resistance. It has outstanding "memory" properties, making it an ideal jacket material for retractile cords.

#### PVC

Sometimes referred to as vinyl or polyvinylchloride. Extremely high or low temperature properties cannot be found in one formulation. Certain formulations may have -55°C to 105°C rating. Other common vinyls may have -20°C to 60°C. There are many formulations for the variety of different applications. The many varieties of PVC also differ in pliability and electrical properties. The price range can vary accordingly. Typical dielectric constant values can vary from 3.5 to 6.5.

#### Rubber

The description of rubber normally includes natural rubber and SBR compounds. Both of these materials can be used for insulations and jackets. There are many formulations of these basic materials. Each formulation is for a specific application. Some formulations are suitable for -55°C minimum, while others are suitable for 75°C maximum.

#### Silicone

This is a very soft insulation which has a temperature range from -80°C to 200°C. It has excellent electrical properties plus ozone resistance, low moisture absorption, weather resistance, and radiation resistance. It typically has low mechanical strength and poor scuff resistance.

#### Teflon®

This material has excellent electrical properties, temperature range and chemical resistance. It is not suitable where subjected to nuclear radiation and does not have good high voltage characteristics. FEP Teflon is extrudable in a manner similar to PVC and polyethylene. This means that long wire and cable lengths are available. TFE Teflon is extrudable in a hydraulic ram type process. Lengths are limited due to amount of material in the ram, thickness of the insulation, and preform size. TFE must be extruded over a silver- or nickel-coated wire. The nickel- and silver-coated designs are rated 260°C and 200°C maximum, respectively. The cost of Teflon is approximately 8 to 10 times more per pound than PVC compounds.

#### Tefzel®

Fluorocopolymer thermoplastic material having excellent electrical properties, heat resistance, chemical resistance, toughness, radiation resistance, and flame resistance. The temperature rating is -65°C to 150°C.

Teflon and Tefzel are DuPont trademarks. Halar is a Solvay Solexis trademark.

Item		Thermal Properties				
		Operating Temperature	Deflection Temp. Under Load	Linear Expansion Coefficient	Thermal Conductivity	Specific Heat
			0.45MPa			
Units		°C	°C	°C <sup>-1</sup>	W/m·K	J/g·K
PET	Standard	-15~55	70	$6.8 \times 10^{-5}$	-	1.3
	Anti-Static	-	69	$7.5 \times 10^{-5}$	-	1.35
PVC	Standard	-	-	-	-	-
	Anti-Static	-30~60	-	$7.0 \times 10^{-5}$	0.16	1.12
Acrylic	Standard	-30~80	100	$7.0 \times 10^{-5}$	0.21	1.46
	Anti-Static	-	85	$5.9 \times 10^{-5}$	-	1.46
Polycarbonate	Standard	-	135	$6.5 \times 10^{-5}$	0.24	1.3
	Anti-Static	-	135	$5.2 \times 10^{-5}$	-	1.2
	Abrasion Resistant	-	135	$6.5 \times 10^{-5}$	-	-
JIS Testing Method		-	K-7191	K-7140	-	-

Item		Mechanical Properties									
		Tensile Strength		Elongation	Bending Strength		Flexural Modulus	Compressive Strength		IZOD Impact Strength	Rockwell Hardness
								Yield Point			M Scale
Units		MPa	kgf/cm <sup>2</sup>	%	MPa	kgf/cm <sup>2</sup>	MPa	MPa	kgf/cm <sup>2</sup>	kJ/m <sup>2</sup>	–
PET	Standard	62	630	15	83	850	2.4×10 <sup>3</sup>	–		10	59
	Anti-Static	52	530	–	71	730	2.0×10 <sup>3</sup>	60	610	–	46
PVC	Standard	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Anti-Static	63	640	50	98	1000	3.4×10 <sup>3</sup>	83	850	2.9	–
Acrylic	Standard	75	760	2~7	117	1200	3.2×10 <sup>3</sup>	124	1270	2.7	100
	Anti-Static	75	760	5	106	1080	3.3×10 <sup>3</sup>	–		–	100
Polycarbonate	Standard	65	663	83	90	9.2	2300	78	7.95	15	67
	Anti-Static	65	663	83	90	9.2	2300	78	7.95	15	70
	Abrasion Resistant	65	663	83	93	9.5	2300	–		–	–
JIS Testing Method		K-7113		K-7113	K-7203		K-7203	K-7181		K-7110	–

Item		Other										
		Light Transmittance by Color				Specific Gravity	Water Absorption	Flame Resistance	Chemical Resistance			
		Clear	Brown Smoke	Orange	Gray Smoke				Oil	Acid	Alkali	Organic Solvent
Units		%				-	%	-	-	-	-	-
PET	Standard	87	28		-	1.27	-	-	Good	Poor	Poor~ Acceptable	Poor
	Anti-Static	80	30	-	-	1.27	-	-	Good	Poor	Poor~ Acceptable	Poor
PVC	Standard	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Anti-Static	80	29	-	-	1.4	0.03	Self-Extinguishing	Good	Good	Good	Poor~ Acceptable
Acrylic	Standard	93	25		-	1.2	0.4	Poor	Good	Good	Good	Poor~ Acceptable
	Anti-Static	79	32	-	-	1.2	0.18	Poor	Good	Good	Good	Poor~ Acceptable
Polycarbonate	Standard	90	35	-	33	1.2	0.24	Self-Extinguishing	Good	Acceptable	Poor	Poor
	Anti-Static	86	35	-	-	1.2	0.15	-	Poor	Poor	Poor	Poor
	Abrasion Resistant	91	-	-	-	1.2	-	-	Good	Acceptable	Poor	Poor
JIS Testing Method		-				-	K-7209	-	-	-	-	-

Item		Electrical Properties				
		Surface Resistivity	Specific Volume Resistivity	Insulation Breakdown Voltage	Dielectric Constant	Dissipation Factor
					10 <sup>6</sup> Hz	10 <sup>6</sup> Hz
Units		Ω	Ω·cm	kV/mm	—	—
PET	Standard	>10 <sup>10</sup>	>10 <sup>11</sup>	—	3.2	—
	Anti-Static	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup>	>10 <sup>17</sup>	—	—	—
PVC	Standard	-	-	-	-	-
	Anti-Static	10 <sup>7</sup> ~10 <sup>8</sup>	—	—	—	—
Acrylic	Standard	>10 <sup>15</sup>	>10 <sup>15</sup>	20	3.2	0.06
	Anti-Static	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup>	>10 <sup>17</sup>	—	2.9	0.032
Polycarbonate	Standard	>2.0×10 <sup>16</sup>	>10 <sup>17</sup>	20	3	0.009
	Anti-Static	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup>	>10 <sup>17</sup>	—	3	0.06
	Abrasion Resistant	>2.0×10 <sup>16</sup>	>10 <sup>17</sup>	20	3	—
JIS Testing Method		K-6911	K-6911	K-6911	K-6911	K-6911

## C4. Electronic Devices

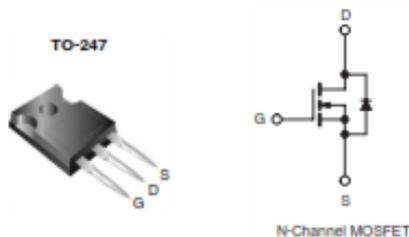


IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix

## Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}$ (V)	500	
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{DS} = 10$ V	0.27
$Q_g$ (Max.) (nC)	210	
$Q_{gs}$ (nC)	29	
$Q_{gd}$ (nC)	110	
Configuration	Single	



## FEATURES

- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead (Pb)-free Available



## DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distances between pins to meet the requirements of most safety specifications.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-247
Lead (Pb)-free	IRFP460PbF SiHFP460-E3
SnPb	IRFP460 SiHFP460

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25$ °C, unless otherwise noted			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	500	V
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$	
Continuous Drain Current	$V_{GS}$ at 10 V	$T_C = 25$ °C	20
		$T_C = 100$ °C	13
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$	80	A
Linear Derating Factor		2.2	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$	960	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>c</sup>	$I_{AR}$	20	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>d</sup>	$E_{AR}$	28	mJ
Maximum Power Dissipation	$P_D$	280	W
Peak Diode Recovery $dV/dt$ <sup>e</sup>	$dV/dt$	3.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw	10	lbf · in
		1.1	N · m

## Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50$  V, starting  $T_J = 25$  °C,  $L = 4.3$  mH,  $R_G = 25$   $\Omega$ ,  $I_{AS} = 20$  A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 20$  A,  $dI/dt \leq 160$  A/ $\mu$ s,  $V_{DD} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 150$  °C.
- 1.6 mm from case.

\* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

## IRFP460, SiHFP460

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	40	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.24	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	0.45	

SPECIFICATIONS $T_J = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
<b>Static</b>						
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{DS}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	500	-	-	V
$V_{DS}$ Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25^\circ\text{C}$ , $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.63	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\ \mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	$I_{GSS}$	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	$\pm 100$	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 500\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 400\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	-	-	0.27	$\Omega$
Forward Transconductance	$g_{fs}$	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 12\text{ A}^b$	13	-	-	S
<b>Dynamic</b>						
Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 25\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}, \text{ see fig. 5}$	-	4200	-	pF
Output Capacitance	$C_{oss}$		-	870	-	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$		-	350	-	
Total Gate Charge	$Q_g$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, V_{DS} = 400\text{ V}, \text{ see fig. 6 and 13}^b$	-	-	210	nC
Gate-Source Charge	$Q_{gs}$		-	-	29	
Gate-Drain Charge	$Q_{gd}$		-	-	110	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 250\text{ V}, I_D = 20\text{ A}, R_{\theta} = 4.3\ \Omega, R_D = 13\ \Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	18	-	ns
Rise Time	$t_r$		-	59	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	110	-	
Fall Time	$t_f$		-	58	-	
Internal Drain Inductance	$L_D$	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	$L_S$		-	13	-	
<b>Drain-Source Body Diode Characteristics</b>						
Continuous Source-Drain Diode Current	$I_S$	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode 	-	-	20	A
Pulsed Diode Forward Current <sup>a</sup>	$I_{SM}$		-	-	80	
Body Diode Voltage	$V_{SD}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 20\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	1.8	V
Body Diode Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 20\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	570	860	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	$Q_{rr}$		-	5.7	8.6	$\mu\text{C}$
Forward Turn-On Time	$t_{on}$	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S$ and $L_D$ )				

**Notes**

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).  
 b. Pulse width  $\leq 300\ \mu\text{s}$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .



**IRFP460, SiHFP460**

Vishay Siliconix

**TYPICAL CHARACTERISTICS** 25 °C, unless otherwise noted

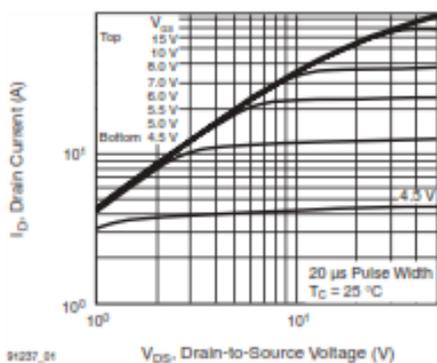


Fig. 1 - Typical Output Characteristics,  $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$

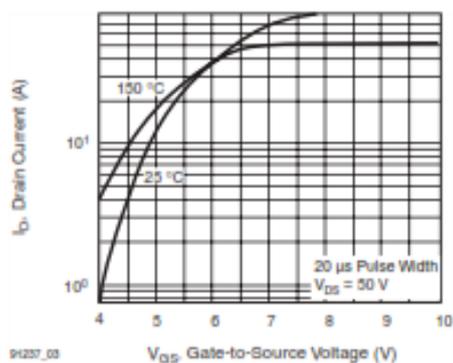


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

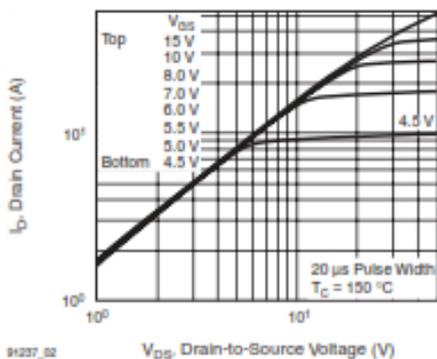


Fig. 2 - Typical Output Characteristics,  $T_C = 150\text{ }^\circ\text{C}$

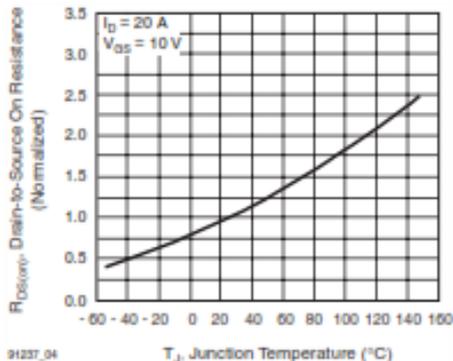
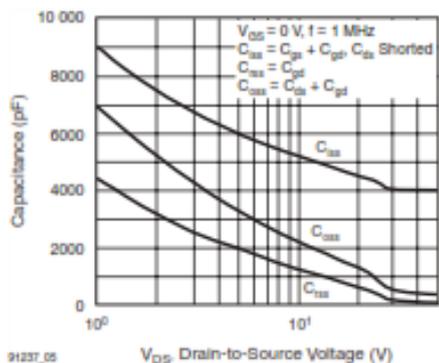


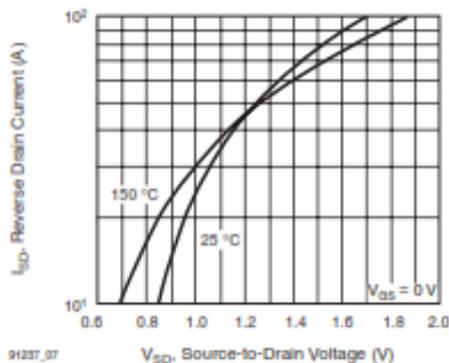
Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

**IRFP460, SiHFP460**

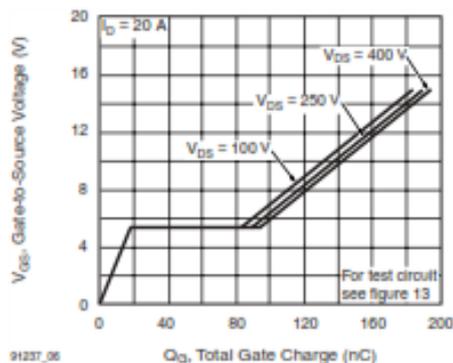
Vishay Siliconix



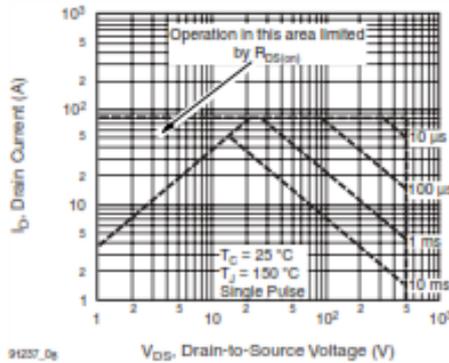
91237\_05 **Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage**



91237\_07 **Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage**



91237\_06 **Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage**



91237\_08 **Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area**



**IRFP460, SiHFP460**

Vishay Siliconix

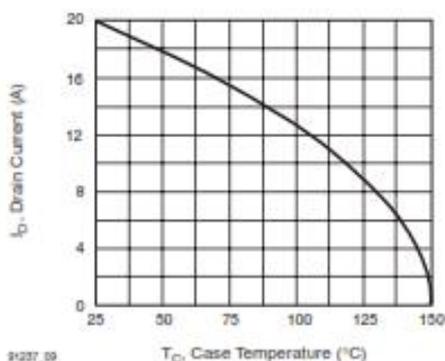


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

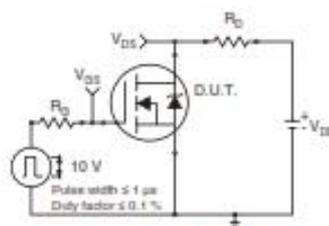


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

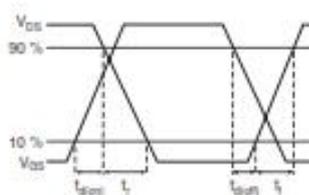


Fig. 10b - Switching Time Waveforms

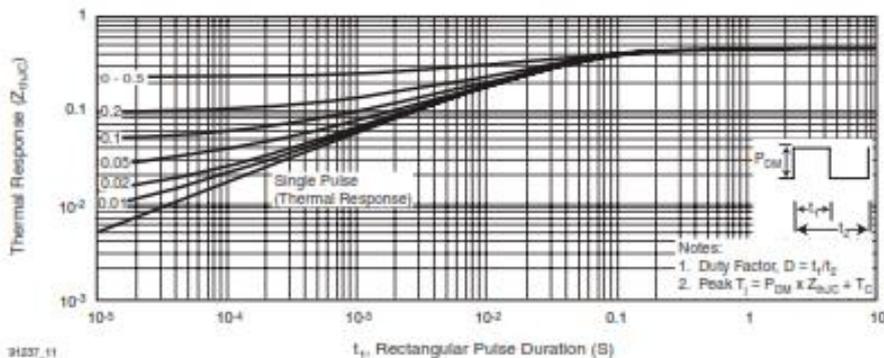


Fig. 11a - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

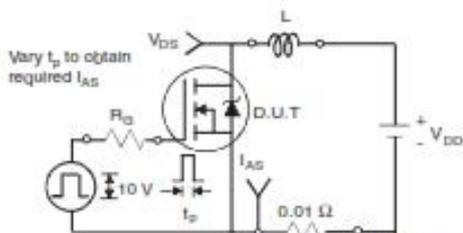


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

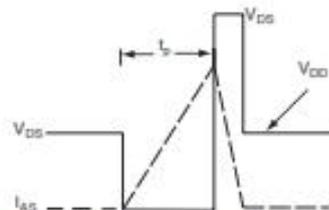
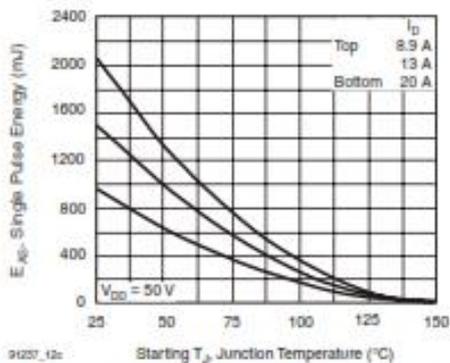


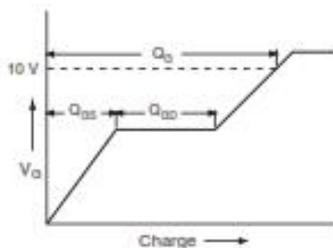
Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

**IRFP460, SiHFP460**

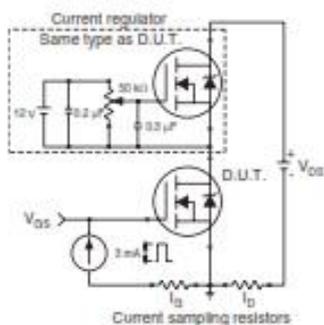
Vishay Siliconix



91237\_12c  
**Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current**



**Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform**



**Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit**

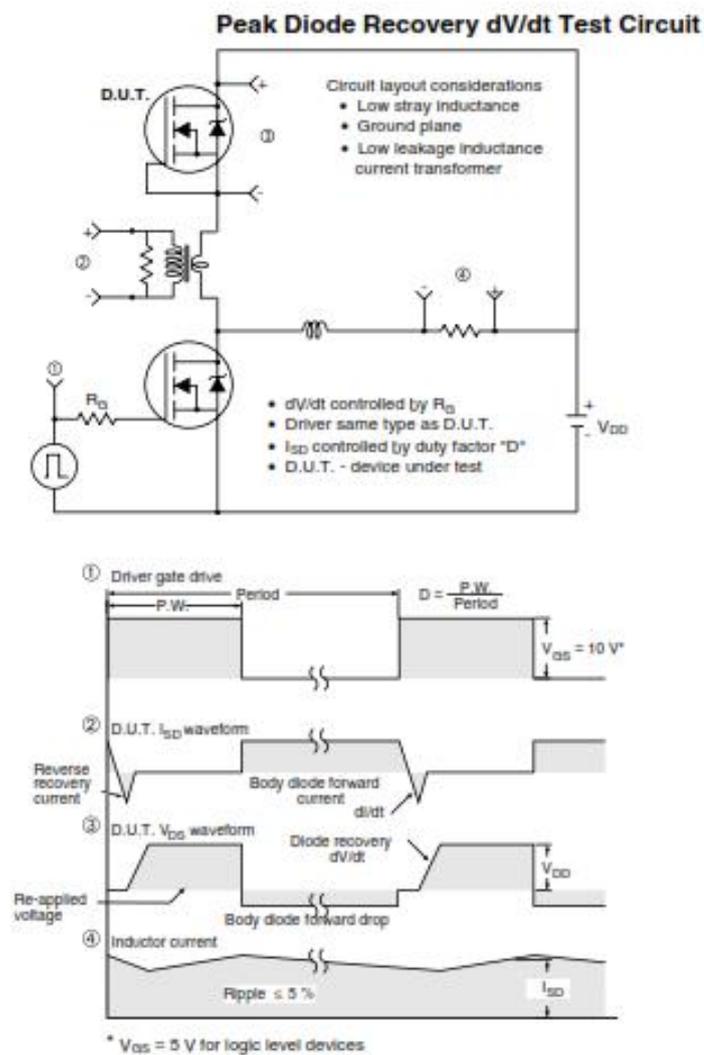


Fig. 14 - For N-Channel

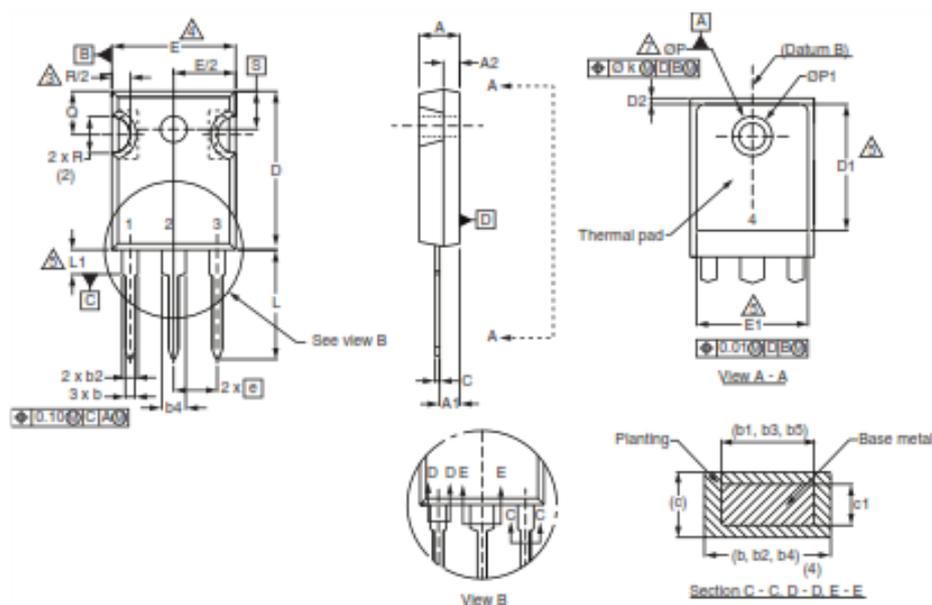
Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see <http://www.vishay.com/ppg791237>.


[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

## Package Information

Vishay Siliconix

### TO-247AC (High Voltage)



DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.58	5.31	0.180	0.209
A1	2.21	2.59	0.087	0.102
A2	1.17	2.49	0.046	0.098
b	0.99	1.40	0.039	0.055
b1	0.99	1.35	0.039	0.053
b2	1.53	2.39	0.060	0.094
b3	1.65	2.37	0.065	0.093
b4	2.42	3.43	0.095	0.135
b5	2.59	3.38	0.102	0.133
c	0.38	0.86	0.015	0.034
c1	0.38	0.76	0.015	0.030
D	19.71	20.82	0.776	0.820
D1	13.08	-	0.515	-

DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
D2	0.51	1.30	0.020	0.051
E	15.29	15.87	0.602	0.625
E1	13.72	-	0.540	-
e	5.46 BSC		0.215 BSC	
Ø k	0.254		0.010	
L	14.20	16.25	0.559	0.640
L1	3.71	4.29	0.146	0.169
N	7.62 BSC		0.300 BSC	
Ø P	3.51	3.66	0.138	0.144
Ø P1	-	7.39	-	0.291
Q	5.31	5.69	0.209	0.224
R	4.52	5.49	0.178	0.216
S	5.51 BSC		0.217 BSC	

ECN: X13-0045-Rev. C, 18-Mar-13  
DWG: 5971

#### Notes

- Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M-1994.
- Contour of slot optional.
- Dimension D and E do not include mold flash. Mold flash shall not exceed 0.127 mm (0.005") per side. These dimensions are measured at the outermost extremes of the plastic body.
- Thermal pad contour optional with dimensions D1 and E1.
- Lead finish uncontrolled in L1.
- Ø P to have a maximum draft angle of 1.5 to the top of the part with a maximum hole diameter of 3.91 mm (0.154").
- Outline conforms to JEDEC outline TO-247 with exception of dimension c.
- Xian and Mingxin actually photo.



Revision: 18-Mar-13

1

Document Number: 91360

 For technical questions, contact: [hym@vishay.com](mailto:hym@vishay.com)

 THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000)



## Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

## Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as Halogen-Free follow Halogen-Free requirements as per JEDEC JS709A standards. Please note that some Vishay documentation may still make reference to the IEC 61249-2-21 definition. We confirm that all the products identified as being compliant to IEC 61249-2-21 conform to JEDEC JS709A standards.

### 15,000 V - 20,000 V Rectifiers

25 mA - 50 mA Forward Current

3000 ns Recovery Time

**X150SG**

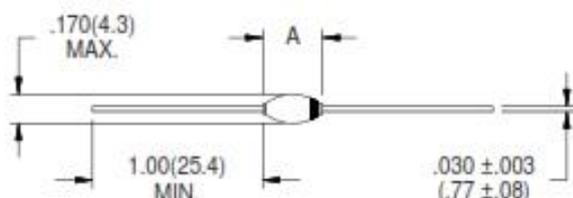
**X200SG**

AXIAL LEADED  
HERMETICALLY SEALED



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AND MAXIMUM RATINGS														
Part Number	Working Reverse Voltage (V <sub>WRM</sub> )	Average Rectified Current (I <sub>O</sub> )		Reverse Current @ V <sub>WRM</sub> (I <sub>R</sub> )		Forward Voltage (V <sub>F</sub> )		1 Cycle Surge Current t <sub>p</sub> =8.3ms (I <sub>FSM</sub> )	Repetitive Surge Current (I <sub>FRM</sub> )	Reverse Recovery Time (3) (T <sub>RR</sub> )	Thermal Impedance θ <sub>J-L</sub>			Junction Cap. @50VDC @ 1KHZ (C <sub>J</sub> )
		55°C(1)	100°C(2)	25°C	100°C	25°C		25°C	25°C	25°C	L=000	L=.125	L=.250	25°C
	Volts	mA	mA	µA	µA	Volts	mA	Amps	Amps	ns	°C/W	°C/W	°C/W	pF
X150SG	15000	50	25	1.0	20	20.0	100	1	0.5	3000	5	12	21.5	2.0
X200SG	20000	25	13	1.0	20	26.0	50	2	0.5	3000	5	12	21.5	2.0

(1)TL=55°C L=0.375" (2)TL=100°C L=0.375" (3)I<sub>F</sub>=125mA, I<sub>R</sub>=250mA, I<sub>RR</sub>=63mA • Op.Temp.= -65°C to +175°C Stg.Temp.= -65°C to +200°C



Part	A
X150SG	.360(9.14) MAX.
X200SG	.380(9.65) MAX.



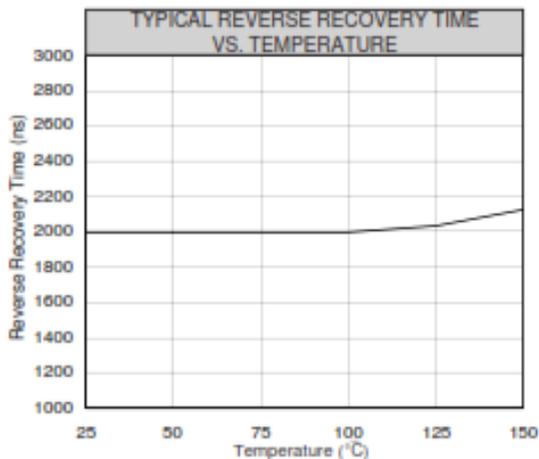
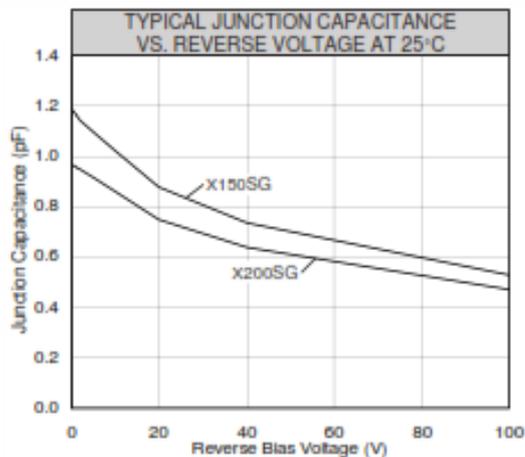
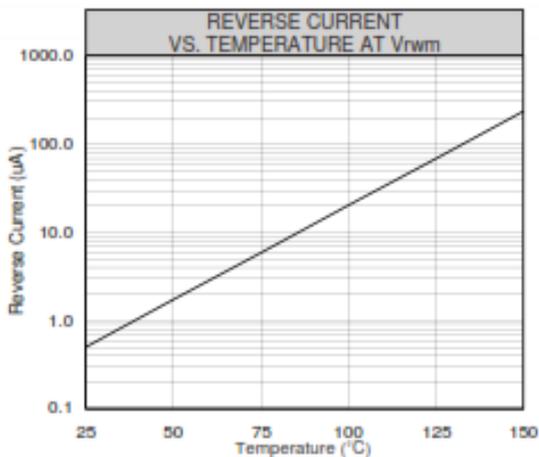
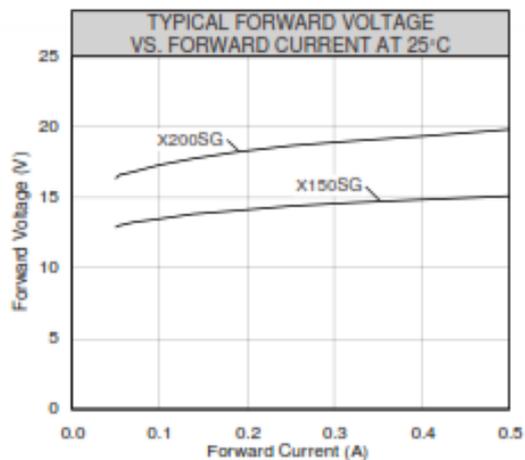
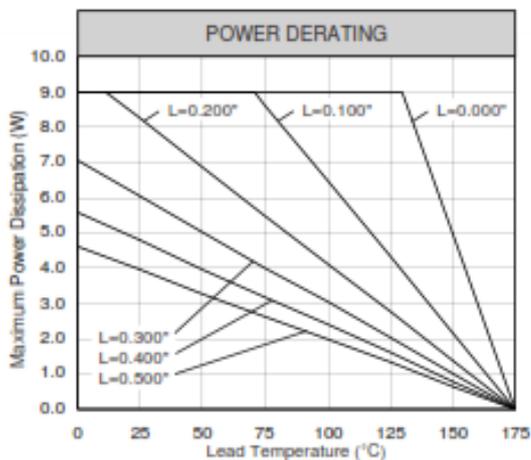
Dimensions: In. (mm) • All temperatures are ambient unless otherwise noted. • Data subject to change without notice.



**VOLTAGE MULTIPLIERS INC.**  
8711 W. Roosevelt Ave.  
Visalia, CA 93291

TEL 559-651-1402  
FAX 559-651-0740  
www.voltagemultipliers.com

**X150SG X200SG**



## C5. Technical Specification for Laser Particle Counter

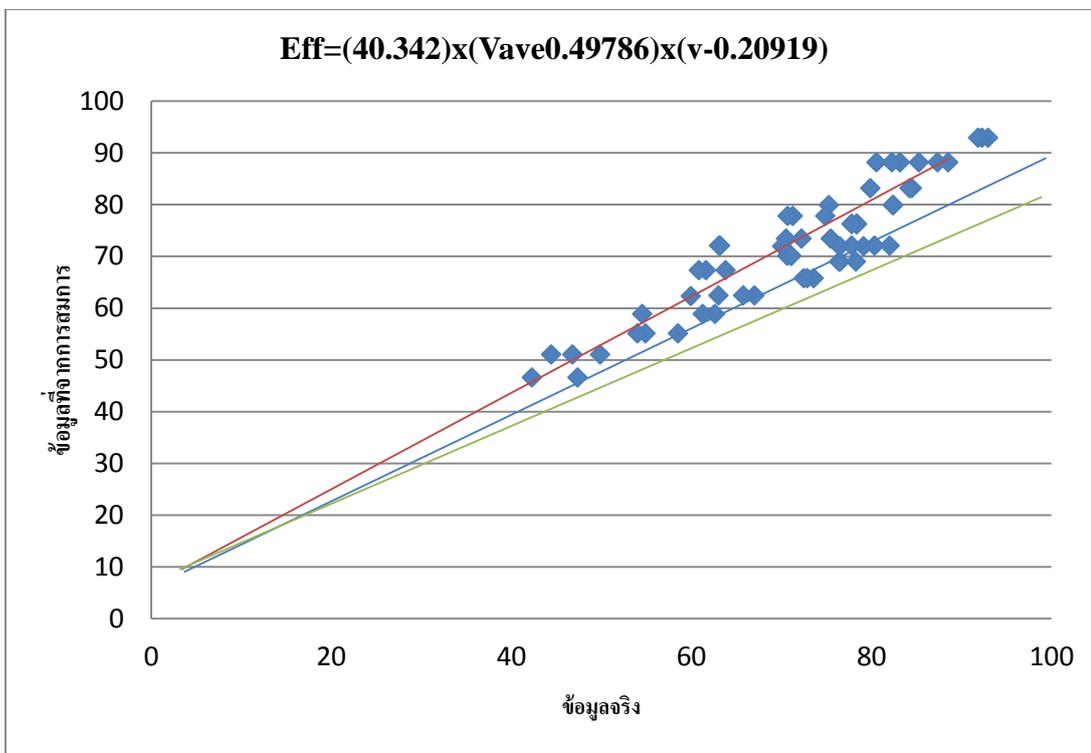
	ParticleScan Pro	ParticleScan CR
<b>Minimum sensitivity</b>	0.3 µm	0.3 µm
<b>Flow rate</b>	0.025 cfm	0.1 cfm
<b>Size channels (µm)</b>	0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0	0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 5.0
<b>Sample time</b>	1–600 seconds (user selectable)	1–600 seconds (user selectable)
<b>Count displayed as</b>	particles per cu. ft., particles per liter or particles per cubic meter (1000L)	particles per cu. ft., particles per liter or particles per cubic meter (1000L)
<b>Display</b>	8-digit LED	8-digit LED
<b>Laser source</b>	Laser diode, 680 nm	Laser diode, 680 nm
<b>Audible alarm range</b>	1–99'999'999 particles per channel	1–99'999'999 particles per channel
<b>Power</b>	120V, 60Hz or 230V, 50Hz	120V, 60Hz or 230V, 50Hz
<b>Rechargeable batteries</b>	Nickel-Metal Hydride, 5 hours continuous operation	Nickel-Metal Hydride, 4 hours continuous operation
<b>Dimensions &amp; weight</b>	7.75 x 4.0 x 2.25 inches (19.5 x 10.0 x 5.5 cm), 1.8 lbs (0.8 kg)	7.75 x 4.0 x 2.25 inches (19.5 x 10.0 x 5.5 cm), 1.8 lbs (0.8 kg)
<b>Supplied accessories</b>	carrying case, purge filter, isokinetic probe, power adaptor, network cable, crossover adapter, USB cable, CD, calib. certificate, user manual	carrying case, purge filter, isokinetic probe, power adaptor, network cable, crossover adapter, USB cable, CD, calib. certificate, user manual
<b>Warranty</b>	1 year on parts and labor	1 year on parts and labor
<b>Data logging</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internal memory for 14'366 data points</li> <li>• Realtime logging to computer via USB or network connection</li> <li>• Data transfer via USB or network conn.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internal memory for 14'366 data points</li> <li>• Realtime logging to computer via USB or network connection</li> <li>• Data transfer via USB or network conn.</li> </ul>
<b>System requirements</b>	<u>Network Connection:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows 98/ME/NT/2000/XP/Vista, OSX or Linux</li> </ul> <u>USB Connectio</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows XP)</li> </ul>	<u>Network Connection:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows 98/ME/NT/2000/XP/Vista, OSX or Linux</li> </ul> <u>ISB Connection:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Windows XP/Vista</li> </ul>

**APPENDIX D**  
**EXPERIMENTALS DATA**

**D1. Total Collection Efficiency of Pulse-Energize ESP**

Pulse peak voltage (kV)	Pulse Frequency (kHz)	Duration times, Td (microsec.)	Residual Voltage (kV)	Gas velocity (m/s)	Collection efficiency(%)
9	40	10	3.6	0.5	83.15
9	40	10	3.6	0.5	82.27
9	40	10	3.6	0.5	80.54
9	40	10	3.6	0.8	82.42
9	40	10	3.6	0.8	82.37
9	40	10	3.6	0.8	75.27
9	40	10	3.6	1	78.38
9	40	10	3.6	1	78.33
9	40	10	3.6	1	77.79
9	40	10	3.6	1.2	75.49
9	40	10	3.6	1.2	72.22
9	40	10	3.6	1.2	70.5
9	40	10	3.6	1.5	71.1
9	40	10	3.6	1.5	70.66
9	40	10	3.6	1.5	71.1
6	40	10	2.4	1	59.92
6	40	10	2.4	1	51.01
6	40	10	2.4	1	48.24
7	40	10	2.8	1	63.8
7	40	10	2.8	1	61.61
7	40	10	2.8	1	60.84
8	40	10	3.2	1	79.14
8	40	10	3.2	1	76.47
8	40	10	3.2	1	70.08
9	40	10	3.6	1	78.38
9	40	10	3.6	1	78.33
9	40	10	3.6	1	77.79
5	40	10	2	0.5	50.42
5	40	10	2	0.5	50.42
5	40	10	2	0.5	49
6	40	10	2.4	0.5	63.18
6	40	10	2.4	0.5	63.09
6	40	10	2.4	0.5	59.01
7	40	10	2.8	0.5	74.87
7	40	10	2.8	0.5	71.26
7	40	10	2.8	0.5	70.68
8	40	10	3.2	0.5	84.47
8	40	10	3.2	0.5	84.24

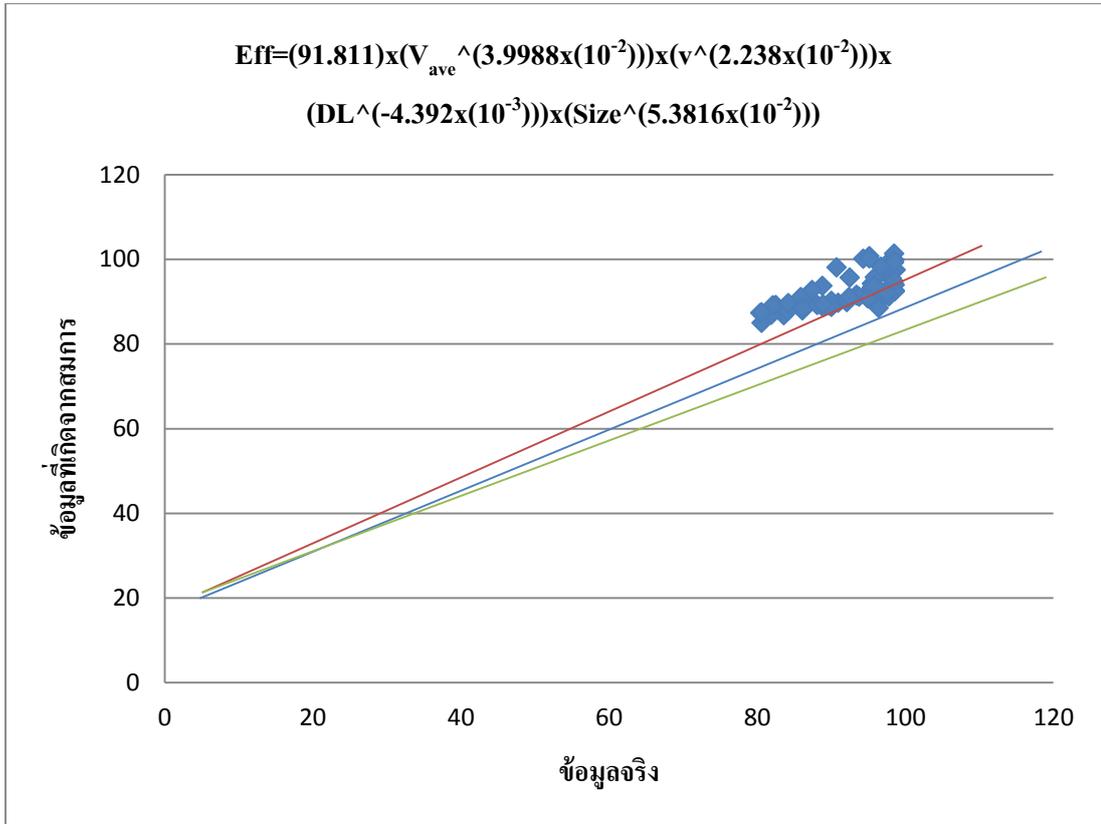
Pulse peak voltage (kV)	Pulse Frequency (kHz)	Duration times, Td (microsec.)	Residual Voltage (kV)	Gas velocity (m/s)	Collection efficiency(%)
8	40	10	3.2	0.5	79.89
9	40	10	3.6	0.5	88.54
9	40	10	3.6	0.5	87.35
9	40	10	3.6	0.5	85.26
10	40	10	4	0.5	92.94
10	40	10	4	0.5	92.28
10	40	10	4	0.5	91.84
5	20	10	1	0.5	47.35
5	20	10	1	0.5	42.27
5	20	10	1	0.5	32.74
6	20	10	1.2	0.5	49.87
6	20	10	1.2	0.5	46.77
6	20	10	1.2	0.5	44.41
7	20	10	1.4	0.5	58.52
7	20	10	1.4	0.5	54.9
7	20	10	1.4	0.5	54.01
8	20	10	1.6	0.5	62.63
8	20	10	1.6	0.5	61.26
8	20	10	1.6	0.5	54.52
9	20	10	1.8	0.5	67.01
9	20	10	1.8	0.5	65.75
9	20	10	1.8	0.5	62.99
10	20	10	2	0.5	73.59
10	20	10	2	0.5	72.88
10	20	10	2	0.5	72.49
11	20	10	2.2	0.5	78.28
11	20	10	2.2	0.5	76.52
11	20	10	2.2	0.5	76.42
12	20	10	2.4	0.5	82.01
12	20	10	2.4	0.5	80.34
12	20	10	2.4	0.5	77.81



**D2. Reduction Efficiency of NTP- Agglomeratoin**

Pulse peak voltage (kV)	Pulse frequency (kHz)	Duration times, Td ( $\mu$ s)	Vave (kV)	Gas velocity (m/s)	Dust Loadi ng ( $10^5$ )	Size ( $10^{-6}$ )	Reduction efficiency (%)
45	20	2	1.8	1	5	0.4	90.01
35	20	2	1.4	1	5	0.4	86.1
25	20	2	1	1	5	0.4	83.6
15	20	2	0.6	1	5	0.4	80.6
45	20	2	1.8	1	5	0.6	94.94
35	20	2	1.4	1	5	0.6	92.1
25	20	2	1	1	5	0.6	88.9
15	20	2	0.6	1	5	0.6	81.9
45	20	2	1.8	1	5	0.85	98.56
35	20	2	1.4	1	5	0.85	97.5
25	20	2	1	1	5	0.85	96.4
15	20	2	0.6	1	5	0.85	96.4
45	20	2	1.8	1	5	1.5	98.11
35	20	2	1.4	1	5	1.5	98.4
25	20	2	1	1	5	1.5	97.8
15	20	2	0.6	1	5	1.5	97.8
45	20	2	1.8	1	5	3.5	98.48
35	20	2	1.4	1	5	3.5	98.09
25	20	2	1	1	5	3.5	98.69
15	20	2	0.6	1	5	3.5	98.12
45	20	2	1.8	1	5	0.4	90.01
45	15	2	1.35	1	5	0.4	84.1
45	13	2	1.17	1	5	0.4	80.4
45	20	2	1.8	1	5	0.6	94.94
45	15	2	1.35	1	5	0.6	90.9
45	13	2	1.17	1	5	0.6	82.5
45	20	2	1.8	1	5	0.85	98.56
45	15	2	1.35	1	5	0.85	93.41
45	13	2	1.17	1	5	0.85	86.4
45	20	2	1.8	1	5	1.5	98.11
45	15	2	1.35	1	5	1.5	95.5
45	13	2	1.17	1	5	1.5	88.8
45	20	2	1.8	1	5	3.5	98.48
45	15	2	1.35	1	5	3.5	97.33
45	13	2	1.17	1	5	3.5	90.69
45	20	2	1.8	1	0.15	0.4	90.01
45	20	2	1.8	1	2.5	0.4	82.1
45	20	2	1.8	1	0.15	0.6	94.94

Pulse peak voltage (kV)	Pulse frequency (kHz)	Duration times, Td ( $\mu$ s)	Vave (kV)	Gas velocity (m/s)	Dust Loading ( $10^5$ )	Size ( $10^{-6}$ )	Reduction efficiency (%)
45	20	2	1.8	1	2.5	0.6	85.9
45	20	2	1.8	1	0.15	0.85	98.56
45	20	2	1.8	1	2.5	0.85	87.4
45	20	2	1.8	1	0.15	1.5	98.11
45	20	2	1.8	1	2.5	1.5	92.5
45	20	2	1.8	1	0.15	3.5	98.48
45	20	2	1.8	1	2.5	3.5	94.29
45	20	2	1.8	1.5	5	0.4	84.2
45	20	2	1.8	1.2	5	0.4	88.1
45	20	2	1.8	1	5	0.4	90.01
45	20	2	1.8	0.8	5	0.4	86.1
45	20	2	1.8	0.5	5	0.4	80.6
45	20	2	1.8	1.5	5	0.6	93.39
45	20	2	1.8	1.2	5	0.6	93.73
45	20	2	1.8	1	5	0.6	94.94
45	20	2	1.8	0.8	5	0.6	92.1
45	20	2	1.8	0.5	5	0.6	88.9
45	20	2	1.8	1.5	5	0.85	95.5
45	20	2	1.8	1.2	5	0.85	96.38
45	20	2	1.8	1	5	0.85	98.56
45	20	2	1.8	0.8	5	0.85	97.5
45	20	2	1.8	0.5	5	0.85	92.4
45	20	2	1.8	1.5	5	1.5	96.4
45	20	2	1.8	1.2	5	1.5	95.86
45	20	2	1.8	1	5	1.5	98.11
45	20	2	1.8	0.8	5	1.5	98.4
45	20	2	1.8	0.5	5	1.5	95.8
45	20	2	1.8	1.5	5	3.5	95.12
45	20	2	1.8	1.2	5	3.5	95.13
45	20	2	1.8	1	5	3.5	98.48
45	20	2	1.8	0.8	5	3.5	98.5
45	20	2	1.8	0.5	5	3.5	96.69



A model to predict the reduction efficiency at various operating conditions could be evaluated from the experimental data as

$$\eta_r = 91.811 \times V_{ave}^{0.039988} \times N^{-0.004392} \times U_g^{0.002238} \times d_p^{0.0053816}, (4.13)$$

$$15 \text{ kV} < V_p < 45 \text{ kV},$$

$$1 \times 10^4 \frac{\text{particle}}{\text{cm}^3} < N < 5 \times 10^5 \frac{\text{particle}}{\text{cm}^3},$$

$$0.5 \text{ m/s} < U_g < 2 \text{ m/s},$$

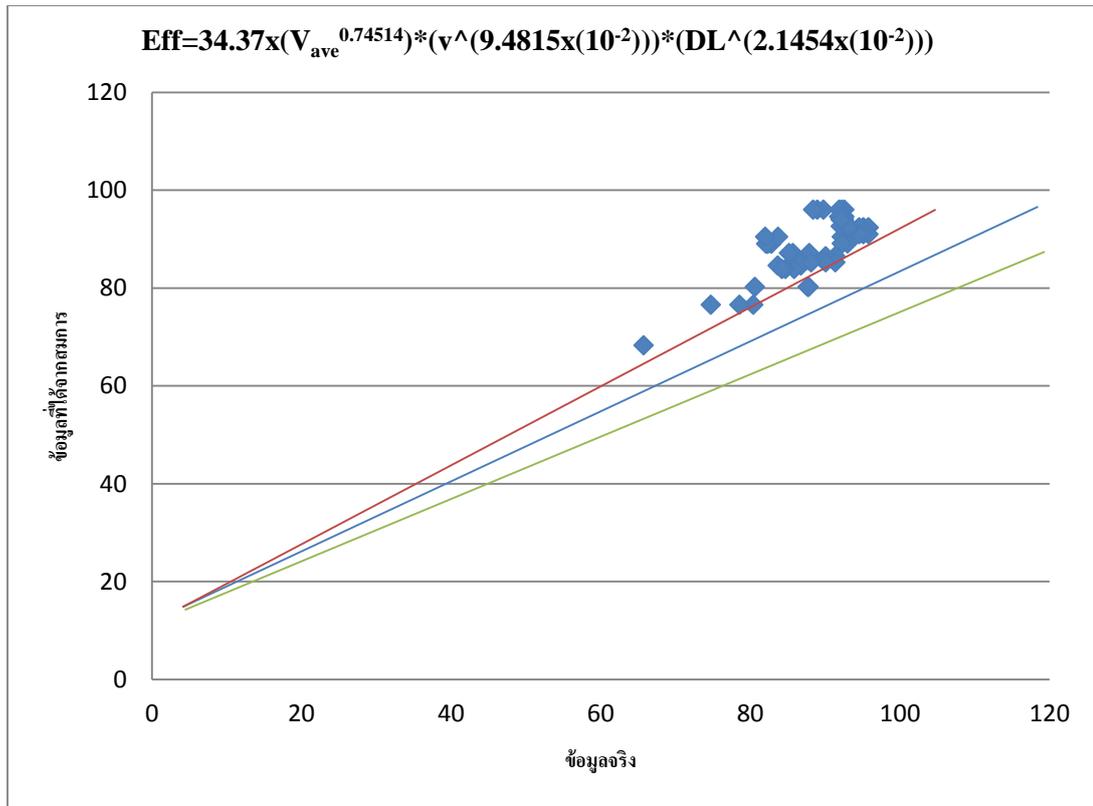
$$0.3 \text{ } \mu\text{m} < d_p < 5 \text{ } \mu\text{m}.$$

The results from the correlation could fit all the experimental data within 10 % deviation.

**D3. Overall Collection Efficiency of NTP- ESP**

Pulse peak voltage (kV)	Pulse frequency (kHz)	Duration times, Td ( $\mu$ s.)	Vave (kV)	Gas velocit y (m/s)	Dust Loading (10 <sup>5</sup> )	Overall Collec. Eff.
9	40	10	3.6	0.5	5	91.36
9	40	10	3.6	0.5	5	90.08
9	40	10	3.6	0.5	5	88.16
9	40	10	3.6	0.8	5	93
9	40	10	3.6	0.8	5	92.27
9	40	10	3.6	0.8	5	92.26
9	40	10	3.6	1	5	95.81
9	40	10	3.6	1	5	95.13
9	40	10	3.6	1	5	94.57
9	40	10	3.6	1.2	5	92.53
9	40	10	3.6	1.2	5	92.2
9	40	10	3.6	1.2	5	92.12
9	40	10	3.6	1.5	5	92.59
9	40	10	3.6	1.5	5	92.21
9	40	10	3.6	1.5	5	91.9
6	40	10	2.4	1	5	65.74
6	40	10	2.4	1	5	59.19
6	40	10	2.4	1	5	54.91
7	40	10	2.8	1	5	80.38
7	40	10	2.8	1	5	78.54
7	40	10	2.8	1	5	74.74
8	40	10	3.2	1	5	86.78
8	40	10	3.2	1	5	86.08
8	40	10	3.2	1	5	83.68
9	40	10	3.6	1	5	95.81
9	40	10	3.6	1	5	95.13
9	40	10	3.6	1	5	94.57
9	40	10	3.6	0.5	0.15	87.79
9	40	10	3.6	0.5	0.15	87.67
9	40	10	3.6	0.5	0.15	80.63
9	40	10	3.6	0.8	0.15	85.86
9	40	10	3.6	0.8	0.15	84.7
9	40	10	3.6	0.8	0.15	84.21
9	40	10	3.6	1	0.15	89.78
9	40	10	3.6	1	0.15	87.76
9	40	10	3.6	1	0.15	87.08
9	40	10	3.6	1.2	0.15	87.9
9	40	10	3.6	1.2	0.15	85.7

Pulse peak voltage (kV)	Pulse frequency (kHz)	Duration times, Td ( $\mu$ s.)	Vave (kV)	Gas velocit y (m/s)	Dust Loading (10 <sup>5</sup> )	Overall Collec. Eff.
9	40	10	3.6	1.2	0.15	85.18
9	40	10	3.6	1.5	0.15	82.8
9	40	10	3.6	1.5	0.15	82.33
9	40	10	3.6	1.5	0.15	82.11
9	40	10	3.6	0.5	2.5	91.36
9	40	10	3.6	0.5	2.5	90.08
9	40	10	3.6	0.5	2.5	88.16
9	40	10	3.6	0.8	2.5	93
9	40	10	3.6	0.8	2.5	92.26
9	40	10	3.6	0.8	2.5	92.27
9	40	10	3.6	1	2.5	95.81
9	40	10	3.6	1	2.5	95.13
9	40	10	3.6	1	2.5	94.57
9	40	10	3.6	1.2	2.5	92.53
9	40	10	3.6	1.2	2.5	92.2
9	40	10	3.6	1.2	2.5	92.12
9	40	10	3.6	1.5	2.5	92.59
9	40	10	3.6	1.5	2.5	92.21
9	40	10	3.6	1.5	2.5	91.9
9	40	10	3.6	0.5	5	71.23
9	40	10	3.6	0.5	5	69.75
9	40	10	3.6	0.5	5	69.71
9	40	10	3.6	0.8	5	73.75
9	40	10	3.6	0.8	5	83.71
9	40	10	3.6	0.8	5	82
9	40	10	3.6	1	5	93.35
9	40	10	3.6	1	5	93.26
9	40	10	3.6	1	5	93.09
9	40	10	3.6	1.2	5	92.32
9	40	10	3.6	1.2	5	92.22
9	40	10	3.6	1.2	5	92.17
9	40	10	3.6	1.5	5	89.76
9	40	10	3.6	1.5	5	88.97
9	40	10	3.6	1.5	5	88.39



A model to predict the overall collection efficiency at various operating conditions could be evaluated from the experimental data as

$$\eta_c = 34.37 \times V_{mean}^{0.74514} \times N^{-0.021454} \times U_g^{0.094815},$$

$$6 \text{ kV} < V_{max} < 10 \text{ kV},$$

$$1 \times 10^4 \frac{\text{particle}}{\text{cm}^3} < N < 5 \times 10^5 \frac{\text{particle}}{\text{cm}^3},$$

$$0.5 \text{ m/s} < U_g < 1.5 \text{ m/s}.$$

The results from the correlation could fit all the experimental data within 10 % deviation.

#### D4. การทดสอบคุณภาพของข้อมูลความเข้มข้นเชิงจำนวนของชุดกำเนิดควัน

การทำาทดลองใช้ชุดกำเนิดอนุภาคจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล มีการควบคุมความเข้มข้นด้วย โดยดูดควันจากการเผาไหม้ดีเซลผสมกับอากาศที่ผ่านแผ่นกรองอนุภาค (HEFPA) ผ่านเข้าไปในเครื่องตกตะกอนที่ทดสอบด้วยความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที โดยปรับความเข้มข้นสูง และความเข้มข้นต่ำ แล้วใช้ชุดวัดและเก็บตัวอย่างทำการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวน โดยเครื่องนับจำนวน Laser particle counter เก็บตัวอย่างจากท่อขนาดผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร บริเวณขาเข้าและขาออกเครื่องตกตะกอน ที่อัตราการไหล 0.1 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ทำการวัดทุก 1 นาที ได้ผลดังนี้

ตาราง D4.1 Number Concentration of Particle at Downstream of ESP

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
1	352,331	197,734	308,414	158,457	39,879
2	332,627	198,318	314,736	185,668	45,504
3	336,286	198,354	321,478	181,199	45,074
4	333,245	194,034	324,716	179,145	46,476
5	265,164	153,208	243,914	139,379	31,329
6	342,451	196,719	319,373	170,027	43,508
7	336,177	195,683	323,654	181,062	44,876
8	364,446	207,858	335,094	171,817	39,701
9	367,638	206,615	325,525	157,507	35,698
10	371,378	210,704	321,132	146,722	34,932
11	389,815	219,876	307,521	129,111	29,912
12	376,546	209,464	314,302	137,183	31,636
13	364,285	206,650	311,020	147,506	31,768
14	376,966	212,292	306,896	137,739	33,676
15	382,596	216,197	307,614	137,709	35,277
16	386,914	215,159	316,053	143,868	34,823
17	388,245	213,204	296,253	122,806	29,150
18	393,716	216,782	308,078	127,254	27,968

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
19	378,208	208,318	299,171	127,894	30,042
20	369,197	207,109	297,674	131,494	32,501
21	370,429	208,840	312,552	143,524	37,192
22	363,023	198,489	298,756	140,846	33,434
23	369,734	209,018	326,556	159,008	37,071
24	355,494	205,933	309,184	151,474	39,932
25	353,601	204,983	308,714	158,042	38,757
26	343,606	198,885	318,572	166,978	42,661
27	351,148	203,532	312,771	160,007	40,721
28	366,361	206,947	311,394	151,803	36,420
29	329,173	197,525	325,487	173,836	43,262
30	332,159	191,456	322,693	184,797	45,641
31	345,098	203,349	317,975	168,513	42,191
32	378,063	209,026	322,751	145,672	33,858
33	366,843	207,435	322,053	150,270	34,428
34	364,499	211,643	322,847	153,539	33,552
35	382,513	211,802	298,250	126,707	29,926
36	420,848	220,961	286,859	112,149	25,664
37	446,393	230,747	281,579	102,743	22,406
38	466,568	218,240	226,628	76,883	14,870
39	463,646	220,169	230,030	76,022	15,756
40	433,946	228,753	281,746	99,938	23,316
41	429,819	223,082	285,921	104,325	22,291
42	448,981	239,378	267,587	95,723	21,009
43	481,148	235,108	243,161	84,572	18,676
44	351,236	160,105	167,409	54,082	11,399
45	429,578	217,861	273,776	107,688	23,953
46	369,417	202,432	302,484	138,836	33,362

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
47	348,746	194,806	313,786	166,679	41,795
48	343,462	196,156	318,062	177,439	41,478
49	360,758	203,467	322,307	153,804	38,810
50	373,779	213,951	317,828	139,482	32,023
51	385,704	222,191	320,749	139,563	28,631
52	381,969	209,991	313,376	130,319	29,553
53	381,722	209,303	298,965	123,042	27,620
54	442,436	228,763	278,835	106,193	23,992
55	490,406	247,187	257,782	87,998	17,013
56	465,752	234,355	245,449	86,736	18,221
57	412,032	221,482	289,721	108,247	24,697
58	401,898	219,486	311,936	128,883	26,658
59	389,138	217,424	311,367	130,554	29,395
60	375,558	204,426	309,183	142,044	31,879
61	375,961	212,208	321,804	137,672	31,995
62	366,956	198,681	306,004	130,267	31,933
63	357,487	205,107	306,219	133,207	29,628
64	355,468	194,949	310,280	137,891	32,589
65	372,957	212,769	324,398	146,216	31,786
66	378,735	212,465	308,343	127,430	27,124
67	401,212	217,753	298,539	119,750	27,777
68	399,977	225,049	310,880	130,308	29,001
69	179,943	71,468	62,683	17,188	2,801
70	386,497	164,506	153,729	47,564	9,104
71	443,017	203,826	196,466	62,292	12,869
72	472,703	228,707	238,700	81,543	18,753
73	486,218	231,723	216,952	71,584	15,637
74	486,132	221,252	204,879	67,433	12,221

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
75	493,502	216,528	174,183	52,889	9,973
76	390,146	155,024	119,283	34,378	4,701
77	508,263	239,052	228,369	76,426	15,636
78	514,899	235,389	216,833	71,554	13,883
79	497,866	241,737	242,523	80,681	15,589
80	439,265	224,239	255,397	89,086	20,738
81	420,613	226,049	281,727	103,407	21,713
82	415,060	220,177	289,353	105,631	22,494
83	401,416	218,973	290,382	110,312	24,972
84	388,016	216,238	296,337	118,700	29,882
85	363,069	204,984	308,295	138,851	32,439
86	359,417	206,018	312,335	140,862	33,501
87	371,779	216,379	309,368	129,883	33,893
88	363,313	208,031	311,158	138,838	33,551
89	358,501	199,205	299,796	141,333	32,698
90	352,714	206,312	306,859	139,061	33,538
91	386,317	204,944	308,252	123,712	29,248
92	366,821	207,883	319,363	138,022	33,514
93	366,528	206,112	322,463	144,002	35,593
94	384,266	213,988	308,722	121,901	28,524
95	412,793	227,916	291,498	112,281	25,083
96	381,833	209,474	301,654	121,990	26,123
97	369,194	205,011	299,896	127,971	29,579
98	364,408	207,761	303,384	132,376	30,808
99	356,183	206,204	313,013	131,353	32,586
100	353,721	204,063	310,683	136,899	32,712
101	369,983	207,836	310,203	129,013	30,134
102	369,306	210,783	306,733	125,076	29,091

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
103	360,582	205,629	310,916	134,230	31,729
104	368,829	206,078	304,916	126,473	29,266
105	376,078	210,783	302,037	119,323	29,307
106	353,413	205,569	299,822	138,598	34,545
107	368,368	207,229	314,788	158,762	39,177
108	373,345	213,609	322,187	147,173	36,639
109	366,182	211,235	310,141	140,421	35,123
110	373,529	213,643	306,591	136,463	33,345
111	483,176	304,652	331,584	122,572	25,928
112	636,222	424,303	351,642	83,817	14,846
113	454,743	279,212	344,502	140,013	33,577
114	357,741	201,984	308,759	140,881	33,304
115	352,483	203,542	303,869	140,903	38,175
116	459,813	282,423	335,247	140,903	30,978
117	532,603	328,667	345,407	120,073	24,889
118	528,949	333,082	348,226	116,903	23,036
119	535,936	358,537	351,062	111,266	19,133
120	579,756	377,044	339,722	92,533	16,709
121	573,294	364,905	351,406	100,553	18,327
122	720,626	500,461	361,046	59,508	7,466
123	649,849	448,904	355,090	73,562	11,104
124	985,151	521,245	258,001	15,961	702
125	1,044,879	441,783	223,592	16,158	1,662
126	456,873	274,447	331,679	123,876	27,222
127	386,522	223,462	305,823	131,233	30,731
128	634,680	403,929	338,862	86,463	16,623
129	867,051	532,237	304,201	30,659	2,804
130	950,354	523,724	255,941	14,709	878

Run	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
131	845,231	538,607	316,022	32,826	3,163
132	640,842	412,603	367,524	93,388	15,844
133	463,134	276,559	325,136	117,013	24,551
134	417,429	241,116	297,262	111,758	24,475
135	408,089	229,214	282,811	104,491	24,390
136	430,768	231,594	266,099	90,636	16,808
137	442,308	238,908	261,353	81,557	15,383
138	459,267	251,578	258,853	78,711	15,583
139	493,277	254,869	220,078	64,850	10,897
140	509,146	262,928	205,709	58,317	7,323
141	527,068	266,274	191,202	51,952	7,142
142	551,314	253,721	167,659	41,089	4,821
143	614,718	249,806	147,293	32,153	3,482
144	668,280	211,637	120,142	23,448	2,392
145	659,684	199,572	115,586	24,368	2,547
146	659,187	200,160	123,272	24,389	3,214

Average	434096	237268	288155	115371	26177
STD	128160.6	74714.73	54200.44	40654.84	11358.99
	10643.16	6204.721	4501.101	3376.201	943.3126
upper	20860	12161	8822	6617	1848
lower	20860	12161	8822	6617	1848

ตาราง D4.2 Number Concentration of Particle at Upstream of ESP

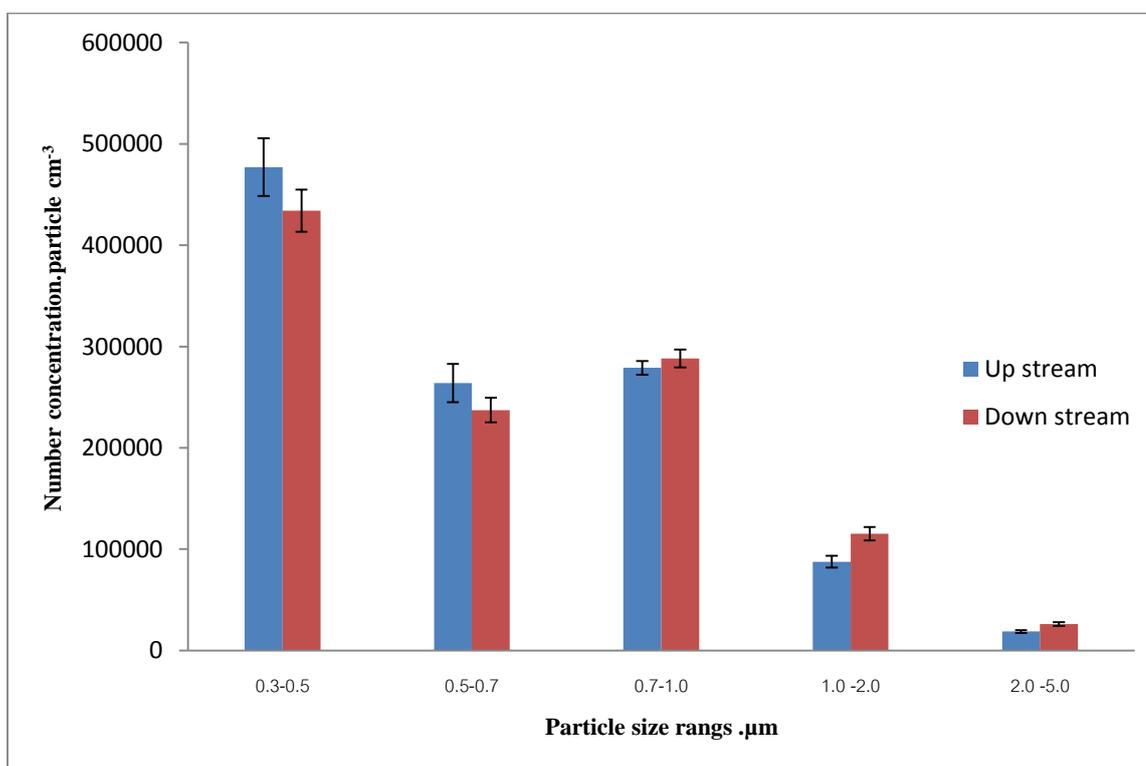
ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
1	428,158	210,326	216,789	72,934	17,860
2	400,861	218,542	288,163	110,975	25,617
3	461,477	235,989	269,434	94,374	22,320
4	435,330	220,049	269,986	97,693	23,640
5	399,079	217,274	286,941	110,285	27,022
6	377,184	208,047	299,327	129,249	30,019
7	350,926	202,358	303,235	152,646	35,989
8	354,358	204,138	320,582	154,993	40,357
9	345,922	198,318	308,392	155,259	37,282
10	350,969	197,391	306,019	156,989	38,412
11	365,127	204,278	310,131	140,937	34,518
12	406,587	218,375	292,808	115,279	27,581
13	418,600	219,560	286,414	104,399	22,042
14	445,680	228,106	272,279	93,854	19,852
15	460,089	234,680	255,971	86,812	18,715
16	452,829	230,411	261,417	88,747	20,395
17	417,023	221,553	274,443	102,611	23,120
18	384,561	212,868	296,228	120,501	27,056
19	393,659	213,738	302,831	120,892	26,983
20	400,641	223,274	298,171	115,106	25,024
21	384,981	210,659	291,845	113,319	25,221
22	409,486	219,644	294,222	103,376	23,149
23	421,639	229,036	280,461	97,301	21,025
24	439,101	238,338	274,212	90,258	18,753
25	424,171	233,657	276,422	92,485	19,247
26	412,446	223,992	282,937	99,316	19,911

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
27	427,825	228,046	288,651	98,166	22,035
28	399,694	219,863	292,848	112,494	24,374
29	408,391	224,273	276,947	100,408	22,804
30	426,754	230,119	274,149	92,293	19,387
31	437,563	231,291	287,948	99,159	21,233
32	400,492	225,495	291,396	104,146	23,639
33	399,496	214,161	295,433	111,208	25,981
34	433,477	228,472	275,889	93,244	18,136
35	451,396	237,879	256,467	80,876	16,811
36	460,350	233,124	243,848	75,440	16,589
37	464,108	235,121	255,919	80,658	17,337
38	449,797	233,044	266,041	86,453	18,737
39	494,542	242,355	247,236	76,934	17,016
40	457,339	237,614	253,046	82,311	15,807
41	423,504	224,216	253,700	88,118	19,031
42	420,319	225,461	275,517	91,360	21,336
43	416,293	227,129	287,978	101,182	20,898
44	418,818	226,417	281,916	95,156	16,921
45	436,106	234,933	279,564	89,194	17,818
46	433,987	234,177	273,689	87,143	18,858
47	470,444	240,883	258,784	77,939	15,581
48	466,112	237,628	256,463	79,004	13,150
49	471,686	243,181	256,200	75,765	13,226
50	486,904	250,671	251,228	75,775	12,838
51	520,161	249,722	219,927	64,811	10,273
52	465,813	239,973	252,761	78,658	14,959
53	429,585	232,514	278,564	93,703	19,047

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
54	436,327	238,370	276,537	88,053	18,012
55	439,934	240,892	272,193	80,091	16,664
56	423,842	224,452	275,602	97,296	19,816
57	404,276	228,356	295,275	103,124	23,857
58	383,443	213,187	295,599	115,002	24,964
59	407,154	230,025	279,933	97,004	21,047
60	421,858	228,477	274,867	89,613	18,219
61	412,454	223,385	260,381	86,592	18,900
62	402,313	220,227	294,136	105,838	22,857
63	412,841	223,694	278,826	100,616	21,105
64	430,692	232,297	264,927	86,221	18,724
65	427,517	231,974	268,889	91,544	17,748
66	415,900	223,053	289,864	100,199	22,585
67	389,562	220,270	291,188	107,003	25,854
68	416,442	239,128	297,489	112,548	27,093
69	461,652	262,548	313,652	106,372	22,040
70	413,745	222,273	283,701	98,409	23,474
71	438,587	234,077	263,920	86,750	18,248
72	406,922	223,231	263,876	88,428	19,200
73	414,671	228,884	283,086	95,912	22,659
74	411,132	227,005	275,881	92,269	22,861
75	395,901	215,825	274,117	103,893	26,375
76	433,507	243,116	298,803	110,363	24,882
77	405,393	222,937	281,212	98,478	22,443
78	423,587	227,471	275,389	92,606	21,354
79	417,109	231,932	272,425	96,676	21,533
80	416,441	226,517	271,910	92,907	19,444

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
81	447,167	246,864	255,622	81,182	16,011
82	442,521	238,818	247,772	72,461	14,645
83	440,240	240,311	244,544	74,918	14,143
84	457,899	240,072	252,143	80,874	16,037
85	567,677	373,174	312,850	64,886	10,996
86	875,849	598,972	336,868	11,679	938
87	904,654	598,529	320,272	9,902	330
88	855,668	600,068	343,582	12,449	699
89	772,568	564,033	349,943	17,592	1,111
90	636,589	438,113	360,186	63,747	7,529
91	558,434	374,535	321,648	71,425	10,748
92	560,993	365,327	321,321	77,040	12,924
93	987,102	514,346	255,944	9,181	278
94	1,251,393	248,248	85,015	610	0
95	785,691	581,319	379,422	25,655	1,924
96	894,461	566,231	314,552	11,221	510
97	926,777	572,696	317,960	10,246	424
98	662,730	481,718	363,900	47,118	4,562
99	483,508	247,441	234,654	72,450	14,131
100	478,659	248,527	251,557	76,397	13,934
101	493,898	274,476	273,826	79,021	15,652
102	459,145	236,281	232,178	74,445	15,467
103	460,704	240,607	232,067	70,978	15,736
104	456,258	242,850	232,037	73,673	15,664
105	460,962	240,082	228,248	72,504	14,101

Average	477110	263996	278986	87596	18717
STD	149119	98834	35075	30120	8060
	14622.34	9691.554	3439.434	2953.512	790.4244
upper	28659	18995	6741	5788	1549
lower	28659	18995	6741	5788	1549



รูป D4.1 แสดง ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคบริเวณทางเข้าและทางออกของเครื่อง  
ตกตะกอน ขณะไม่มีการจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อ  
วินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ตาราง D4.3 Number Concentration of Particle at Downstream of ESP

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
1	12,078	1,994	1,214	325	65
2	12,447	2,016	932	346	65
3	11,857	2,276	888	151	65
4	12,998	2,213	1,041	195	108
5	13,849	2,279	672	151	65
6	12,183	1,886	953	260	86
7	12,209	2,190	975	195	173
8	14,029	2,019	1,064	434	86
9	12,950	1,995	954	303	21
10	13,521	2,148	781	173	151
11	12,561	2,191	998	368	195
12	13,284	2,235	998	282	108
13	11,924	2,081	910	325	151
14	12,868	2,517	781	260	195
15	13,260	2,126	1,041	282	21
16	12,272	1,929	975	281	173
17	13,260	2,213	954	303	130
18	13,080	1,822	824	455	21
19	13,434	1,909	933	325	65
20	12,802	2,603	976	216	21
21	12,342	2,234	1,062	520	43
22	12,688	1,887	1,214	130	65
23	13,036	1,952	780	281	43
24	12,581	2,039	1,149	390	43
25	12,651	2,343	1,236	303	173
26	13,215	2,191	954	282	21

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
27	12,568	2,517	1,237	434	86
28	12,951	1,974	997	238	108
29	13,049	2,410	1,085	369	260
30	12,733	2,299	737	347	21
31	13,459	2,279	911	369	86
32	12,032	1,864	1,149	281	65
33	12,165	2,450	824	346	0
34	12,016	2,451	1,301	325	65
35	12,516	2,364	1,041	238	65
36	13,303	1,996	1,063	282	151
37	12,319	1,865	1,236	347	195
38	13,066	1,996	1,410	303	108
39	13,045	2,365	824	542	260
40	13,458	1,888	1,345	238	173
41	13,256	2,104	889	216	43
42	13,259	1,974	998	282	130
43	13,636	2,171	998	369	151
44	12,539	2,277	867	390	173
45	12,208	2,038	1,019	303	86
46	12,187	2,190	1,084	238	65
47	13,304	2,061	1,215	195	108
48	13,414	1,996	1,041	347	173
49	12,624	2,125	976	216	65
50	14,467	2,259	847	260	86
51	12,714	2,104	824	303	43
52	13,238	2,105	998	303	130
53	12,386	2,407	954	303	151

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
54	12,273	2,038	1,040	238	130
55	12,493	1,930	932	433	108
56	13,876	2,128	1,172	304	86
57	13,412	1,931	1,063	325	151
58	13,874	2,106	977	260	151
59	13,067	2,235	1,128	325	195
60	12,339	1,973	867	260	108
61	13,090	2,149	1,193	434	86
62	13,043	2,040	1,063	390	151
63	12,775	1,865	1,041	260	108
64	12,937	2,235	998	434	217
65	12,499	2,191	1,236	455	151
66	13,267	2,497	1,020	434	130
67	12,715	2,104	1,063	585	86
68	12,935	2,560	954	390	86
69	13,367	1,844	998	282	43
70	13,177	2,127	1,345	260	108
71	12,707	1,843	845	238	65
72	11,873	1,863	541	238	86
73	12,686	1,995	910	130	65
74	13,765	2,258	955	369	130
75	13,541	1,953	889	130	108
76	13,173	2,148	1,085	347	65
77	12,975	2,169	998	390	86
78	12,628	2,321	1,301	238	43
79	12,841	2,364	629	238	108
80	12,711	2,125	867	238	65

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
81	12,317	2,103	997	260	86
82	13,284	2,257	1,150	369	21
83	13,172	2,300	868	217	130
84	13,851	2,149	998	238	86
85	13,027	2,605	1,042	521	130
86	12,274	2,212	867	325	86
87	12,402	1,994	932	238	21
88	12,974	2,278	846	303	43
89	12,929	1,735	1,041	325	108
90	12,295	2,298	802	281	43
91	14,095	2,389	977	260	86
92	13,543	1,953	976	347	108
93	12,739	2,712	911	282	108
94	12,208	2,298	758	325	65
95	13,723	2,280	1,259	195	65
96	12,690	2,039	1,019	325	108
97	12,755	2,104	954	325	86
98	13,022	2,365	933	303	108
99	12,886	1,974	997	325	108
100	13,656	2,149	1,259	173	86
101	13,194	2,235	759	282	130
102	13,393	2,105	1,085	325	65
103	12,341	2,299	824	260	108
104	13,106	1,931	1,106	347	130
105	12,080	2,298	1,041	281	108
106	13,328	2,170	1,041	412	65
107	13,938	1,975	803	369	130

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
108	12,998	2,104	868	368	217
109	11,840	2,537	997	281	65
110	13,063	2,083	1,063	130	130
111	12,740	2,235	1,150	434	86
112	13,059	1,865	997	347	86
113	13,214	1,931	1,106	303	43
114	13,192	1,952	889	412	108
115	12,668	2,234	911	303	86
116	12,252	2,363	889	195	108
117	12,514	2,016	1,019	281	130
118	13,106	2,321	802	325	65
119	11,725	1,994	910	281	108
120	12,605	2,256	1,019	325	173
121	12,731	1,930	1,084	238	65
122	12,893	2,474	1,258	238	65
123	12,753	2,082	802	325	108
124	12,778	2,386	976	130	108
125	12,337	1,886	1,127	173	86
126	12,562	2,668	889	282	151
127	13,107	2,191	846	303	151
128	13,064	2,191	954	347	173
129	12,646	2,147	932	347	65
130	13,325	2,061	1,020	238	130
131	13,352	2,627	890	390	130
132	12,711	1,952	976	347	65
133	13,131	2,235	1,085	434	43
134	12,955	2,278	1,085	260	86

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
135	12,430	2,277	1,084	347	21
136	14,013	2,411	1,173	325	130
137	14,031	2,258	1,020	390	65
138	12,344	2,147	1,345	368	86
139	12,673	2,517	1,237	282	0
140	12,582	2,299	911	412	130
141	12,388	2,321	1,019	433	130
142	12,277	2,039	1,062	477	130
143	12,654	2,735	955	347	173
144	12,382	2,125	954	303	21
145	12,794	1,930	715	238	108
146	12,335	1,821	715	346	86
147	12,190	2,407	1,084	281	130
148	13,284	2,105	1,324	217	108
149	13,088	2,235	1,128	325	65
150	11,534	2,189	1,300	346	65
151	13,105	2,017	759	433	65
152	12,303	2,452	1,063	477	173
153	12,716	2,235	1,215	282	65
154	13,221	2,735	1,063	151	86
155	12,362	2,147	1,106	238	43
156	12,630	2,517	1,171	282	130
157	13,327	2,083	911	499	173
158	13,543	2,083	933	195	130
159	12,516	2,234	1,171	238	21
160	12,362	2,147	1,062	303	65
161	13,323	2,104	802	282	43

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
162	13,125	1,800	1,084	282	86
163	12,930	2,191	889	282	65
164	12,602	2,038	932	368	130
165	12,779	2,234	1,084	303	65
166	12,692	2,039	1,171	325	21
167	12,847	2,170	1,302	195	195
168	13,133	2,257	1,041	347	130
169	12,863	2,104	802	216	173
170	13,266	2,431	1,237	282	86
171	12,798	2,386	715	260	108
172	12,605	2,234	889	390	130
173	12,888	2,126	1,041	325	130
174	12,543	2,235	1,215	607	65
175	13,279	1,974	867	390	65
176	12,630	2,560	1,128	303	21
177	12,561	2,560	911	195	151
178	12,802	2,126	1,301	260	65
179	12,473	1,930	1,171	368	216
180	13,088	2,170	976	325	195
181	12,975	2,104	1,150	260	43
182	12,843	2,212	1,084	195	21
183	12,777	1,974	1,171	260	65
184	13,242	2,561	1,128	195	65
185	12,996	1,909	889	325	238
186	12,387	2,299	954	477	86
187	12,559	2,169	1,149	216	65
188	14,153	1,758	911	173	108

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
189	13,171	2,234	1,084	151	0
190	12,715	2,321	1,063	412	43
191	12,623	2,082	802	303	195
192	12,932	2,126	1,236	195	130
193	13,261	2,474	976	86	86
194	13,592	2,410	825	434	21
195	13,216	1,931	1,041	325	86
196	14,048	2,171	868	217	151
197	11,790	2,015	758	325	108
198	12,445	1,951	997	151	65
199	13,285	2,170	1,107	369	43
200	12,648	2,104	1,019	390	86
201	13,194	2,235	911	303	130
202	12,806	2,431	1,106	455	130
203	13,217	2,083	1,237	217	108
204	11,554	2,232	953	476	130
205	12,782	2,365	1,193	368	130
206	13,325	2,040	1,041	260	108
207	12,580	2,169	780	303	65
208	12,187	2,103	867	412	151
209	13,022	2,387	976	347	108
210	13,875	2,236	998	238	195
211	12,731	1,952	976	260	21
212	12,715	2,169	1,280	238	43
213	12,841	2,060	824	173	43
214	13,702	2,214	933	456	108
215	12,603	2,082	1,062	368	86

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
216	12,470	2,168	932	303	65
217	12,585	2,148	1,193	390	108
218	13,237	2,148	824	151	151
219	13,767	2,236	977	369	65
220	12,802	2,365	933	325	108
221	13,058	1,930	780	303	65
222	11,770	2,124	823	346	108
223	12,121	2,276	954	173	108
224	12,910	2,017	1,193	390	0
225	12,670	2,212	998	347	173
226	12,884	1,778	976	238	86
227	12,079	2,298	1,149	238	86
228	12,467	1,821	802	390	86
229	13,018	2,147	954	347	21
230	12,074	1,842	845	260	151
231	12,367	2,451	1,193	260	151
232	12,383	1,951	1,019	216	195
233	12,886	1,974	1,019	347	108
234	13,217	2,235	846	325	108
235	13,154	2,387	1,107	325	108
236	12,644	2,082	975	238	21
237	12,882	2,016	585	325	65
238	12,364	2,147	1,106	390	86
239	12,493	2,190	867	368	195
240	12,300	2,277	1,171	455	43
241	13,197	2,474	976	325	86
242	12,866	2,061	1,171	282	130

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
243	12,099	2,060	867	390	216
244	12,497	2,581	1,084	260	108
245	13,346	2,213	868	260	65
246	12,998	2,170	1,085	282	65
247	12,671	2,278	1,128	347	108
248	12,687	1,843	954	368	43
249	13,373	2,279	1,150	260	151
250	12,907	1,908	1,084	173	151
251	13,106	2,148	911	303	43
252	12,842	2,104	911	260	130
253	12,696	2,213	1,193	477	130
254	12,583	2,104	911	412	151
255	12,952	2,256	846	216	65
256	12,716	2,321	1,019	477	173
257	12,949	1,865	889	347	108
258	13,198	2,301	1,042	325	130
259	12,298	2,060	1,258	281	151
260	12,426	2,016	954	303	86
261	12,387	2,277	976	368	216
262	13,177	2,149	1,128	282	238
263	12,602	2,082	911	412	86
264	12,566	2,126	1,367	499	195
265	13,022	2,192	1,172	303	238
266	13,330	2,214	1,020	455	151
267	12,041	2,343	1,280	542	195
268	13,084	1,844	1,236	347	151
269	13,092	2,496	1,194	303	173

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
270	12,414	2,365	1,150	629	173
271	13,001	2,148	1,367	347	108
272	12,699	2,214	1,541	434	303
273	13,098	2,736	1,390	390	282
274	12,736	2,082	1,084	368	195
275	13,218	2,257	998	455	108
276	12,759	2,191	1,019	455	43
277	12,625	1,995	1,128	368	108
278	12,992	1,778	1,041	281	21
279	13,416	2,301	1,107	173	173
280	13,082	1,952	1,128	216	43
281	12,891	2,387	933	368	21
282	12,364	2,321	1,019	303	130
283	12,780	2,408	889	347	130
284	12,518	2,386	954	303	43
285	12,601	2,038	1,084	216	86
286	13,151	2,148	933	434	108
287	14,073	2,150	1,107	238	152
288	12,216	2,625	1,280	390	151
289	12,977	2,213	998	303	195
290	12,759	2,148	1,236	260	217
291	12,628	2,495	846	390	108
292	12,694	2,300	911	455	195
293	12,408	2,125	1,236	303	195
294	12,431	2,321	1,063	412	130
295	13,132	2,040	1,367	195	282
296	13,006	2,562	1,215	434	86

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
297	12,694	2,039	911	434	325
298	12,938	2,149	1,389	499	130
299	12,551	2,714	1,302	694	173
300	13,288	2,084	1,259	629	282
301	12,676	2,062	1,410	651	195
302	13,252	2,607	1,607	456	238
303	13,055	2,541	1,716	499	217
304	12,766	2,431	1,172	607	260
305	13,096	2,302	1,520	629	347
306	11,802	2,299	1,236	650	238
307	13,165	2,433	1,607	630	304
308	14,685	2,436	1,327	652	435

Average	12,857	2,181	1,031	325	113
STD	498.7093	201.6313	173.3974	104.345	64.73625
	28.46284	11.50771	9.896311	5.955284	3.694693
upper	55	22	19	11	7
lower	55	22	19	11	7

ตาราง D4.4 Number Concentration of Particle at Upstream of ESP

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
1	13,870	2,565	1,521	673	326
2	13,785	2,500	1,848	782	369
3	13,692	2,542	1,499	717	282
4	14,401	2,958	1,501	870	261
5	14,312	2,610	1,696	543	261
6	14,265	2,848	1,413	739	217
7	14,178	2,696	1,761	652	86
8	14,327	2,478	1,478	565	456
9	13,875	3,110	1,631	608	326
10	14,559	2,916	1,175	696	261
11	14,106	2,151	1,543	565	347
12	13,408	2,651	1,477	630	412
13	13,996	1,956	1,477	652	304
14	13,343	2,825	1,651	478	260
15	14,092	2,674	1,348	869	347
16	13,977	2,565	1,391	543	326
17	13,366	2,803	1,543	543	195
18	13,612	2,892	1,435	543	282
19	14,083	2,455	1,456	369	260
20	13,820	2,759	1,303	543	195
21	14,306	2,783	1,195	652	173
22	14,127	2,890	1,064	586	65
23	14,872	2,761	1,000	478	195
24	14,100	2,107	1,412	434	130
25	13,115	2,497	1,281	499	108
26	13,274	2,411	1,346	869	238
27	14,565	2,761	1,021	391	369
28	13,687	2,693	1,173	456	195
29	13,730	2,129	1,455	586	217
30	14,174	2,478	1,543	543	130
31	13,687	2,389	1,303	543	217

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
32	12,850	2,409	1,193	520	86
33	13,028	2,605	1,259	521	130
34	13,819	2,433	1,390	521	152
35	12,193	2,386	1,171	303	130
36	13,178	2,409	1,194	412	130
37	13,030	2,736	1,346	456	86
38	12,856	2,627	1,368	694	130
39	13,599	2,324	1,368	608	217
40	13,645	2,455	1,434	673	195
41	13,278	2,542	1,673	478	217
42	13,799	2,564	1,216	608	152
43	14,578	1,955	1,064	434	130
44	14,265	2,957	1,391	608	260
45	14,923	2,675	1,392	696	282
46	13,075	2,584	1,672	434	108
47	13,600	2,476	1,368	586	152
48	14,496	2,325	1,217	652	108
49	13,111	1,888	1,215	477	434
50	13,426	2,650	1,368	651	108
51	13,568	2,040	1,085	347	65
52	14,429	2,020	1,238	499	260
53	12,673	1,996	1,258	585	65
54	14,123	2,259	1,325	521	195
55	13,160	2,606	1,259	456	152
56	13,882	2,433	1,129	347	173
57	13,377	2,106	1,563	369	108
58	13,069	2,084	1,324	629	151
59	13,243	1,845	1,454	542	151
60	13,207	2,389	1,520	434	152
61	13,600	2,694	1,129	586	282
62	12,347	2,278	1,193	607	151
63	14,283	2,804	1,369	630	65
64	14,564	2,347	1,217	499	239

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
65	14,058	2,563	1,064	456	304
66	13,838	2,128	1,346	369	325
67	13,248	2,084	1,628	456	325
68	13,576	2,367	1,411	412	195
69	13,004	2,474	1,020	455	108
70	13,838	2,237	1,281	369	260
71	13,667	2,563	1,281	434	86
72	13,752	2,172	1,585	369	217
73	12,410	1,996	1,323	433	195
74	13,775	2,433	1,390	369	282
75	13,357	2,345	1,607	325	195
76	14,013	2,476	1,129	477	173
77	13,496	2,477	1,499	586	304
78	13,540	2,499	1,521	847	260
79	13,247	2,171	1,237	564	260
80	12,652	2,170	1,128	542	325
81	13,510	2,454	1,411	412	108
82	13,484	2,019	1,302	521	217
83	14,351	2,544	1,696	652	152
84	13,603	2,477	1,651	456	260
85	13,291	2,388	1,324	564	152
86	14,346	2,282	1,434	695	195
87	13,118	2,584	1,455	477	152
88	12,632	2,387	1,215	542	195
89	14,648	2,216	1,325	478	130
90	13,289	2,084	1,498	477	151
91	14,317	2,346	1,129	391	130
92	14,455	2,934	999	391	130
93	13,443	2,367	1,151	456	152
94	13,111	2,257	1,128	325	173
95	13,067	2,257	1,193	542	43
96	13,134	2,496	1,150	390	86
97	13,355	2,215	1,129	651	173

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
98	13,668	2,368	1,303	565	239
99	14,296	2,346	1,021	217	195
100	13,772	2,628	955	499	130
101	12,978	2,213	1,150	390	130
102	13,634	2,019	1,367	260	86
103	13,505	2,323	955	412	108
104	13,840	2,802	1,281	347	65
105	13,547	2,149	1,194	325	108
106	13,339	2,693	1,303	369	217
107	13,569	2,149	998	477	86
108	14,573	1,780	1,064	304	86
109	13,465	2,323	1,259	347	217
110	12,917	2,388	1,194	455	195
111	13,268	2,280	1,237	521	260
112	13,287	2,192	1,259	499	86
113	12,737	2,473	889	347	86
114	13,049	2,562	1,150	499	108
115	12,855	2,670	1,216	434	238
116	13,686	2,433	1,498	304	86
117	13,704	2,410	1,020	347	195
118	13,879	2,280	1,151	390	260
119	12,863	1,648	1,301	282	65
120	12,672	2,343	1,084	303	108
121	11,954	2,755	1,258	325	130
122	13,530	2,410	912	456	260
123	13,203	2,801	1,194	390	65
124	13,899	2,302	1,172	238	195
125	13,461	2,344	738	564	130
126	12,826	2,300	1,128	434	151
127	13,500	2,083	1,041	260	86
128	13,003	2,236	1,107	347	173
129	13,836	2,302	1,086	608	86
130	13,704	2,541	1,064	412	65

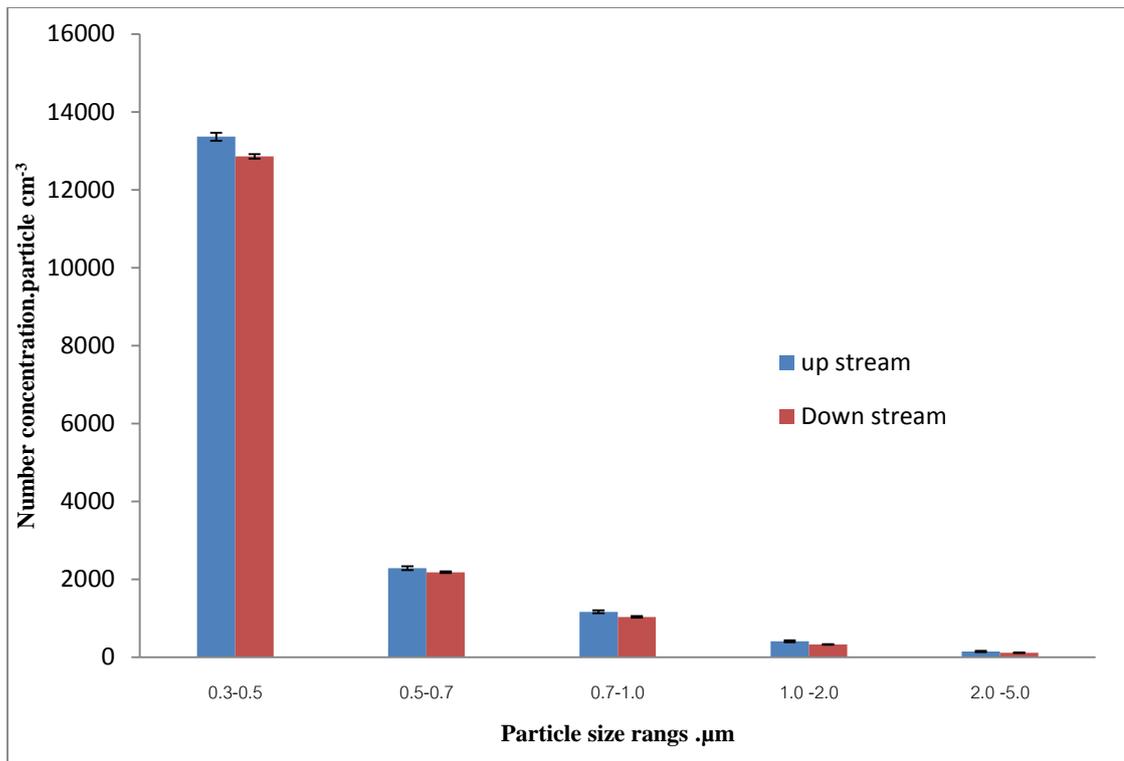
ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
131	12,344	2,494	1,106	368	86
132	12,934	2,040	1,085	477	173
133	14,008	2,345	1,064	260	43
134	12,665	1,843	910	347	65
135	13,508	2,475	1,042	412	152
136	12,693	2,408	976	368	151
137	12,674	2,322	1,237	390	108
138	13,610	2,257	781	347	65
139	13,855	2,171	1,042	412	108
140	12,720	2,496	1,324	499	108
141	12,034	2,081	954	390	108
142	13,373	2,323	1,128	390	43
143	13,080	1,995	932	195	65
144	13,543	1,714	1,128	303	173
145	12,841	1,865	911	412	108
146	12,753	2,060	910	260	43
147	12,632	2,365	1,150	347	282
148	12,889	2,386	1,128	216	65
149	13,524	2,040	1,042	347	173
150	12,822	1,909	998	499	21
151	13,983	2,084	955	303	65
152	13,378	2,606	1,281	347	130
153	12,976	2,191	1,041	303	108
154	13,001	2,235	1,237	303	108
155	13,414	2,062	1,324	195	86
156	12,977	2,018	1,171	325	108
157	13,720	2,257	868	238	108
158	13,628	1,996	889	217	108
159	14,032	2,367	1,129	282	173
160	13,131	2,040	1,280	260	173
161	13,878	2,193	1,303	369	86
162	12,608	2,604	1,128	238	86
163	12,581	2,082	954	325	108

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
164	13,154	2,083	1,128	499	195
165	12,408	2,234	1,149	303	108
166	12,253	1,908	1,149	390	86
167	13,372	1,932	1,302	195	217
168	12,957	2,474	954	347	130
169	12,649	2,213	1,041	325	151
170	13,547	2,236	1,107	217	108
171	13,462	2,106	1,281	542	65
172	13,367	1,866	1,063	260	86
173	12,782	2,322	1,193	390	173
174	13,327	2,235	955	238	108
175	13,461	1,975	1,194	303	173
176	12,670	2,278	1,236	195	65
177	13,953	1,649	716	303	43
178	14,357	1,998	1,020	390	173
179	13,702	2,301	1,107	369	43
180	13,280	1,974	1,150	325	43
181	13,086	1,888	1,215	151	108
182	12,058	2,472	824	347	195
183	12,821	2,017	976	238	65
184	13,304	2,105	976	477	108
185	13,156	2,323	1,150	325	108
186	12,535	2,016	910	216	108
187	13,104	1,974	911	282	151
188	13,395	2,366	1,042	347	108
189	12,521	2,560	1,323	238	86
190	12,991	1,995	824	130	21
191	13,264	2,474	1,107	260	130
192	12,820	2,147	780	325	86
193	13,695	2,061	868	282	65
194	12,038	2,039	1,366	347	130
195	12,847	2,452	976	303	86
196	13,541	1,866	889	195	151

ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
197	13,112	2,301	1,020	390	173
198	12,799	2,234	846	325	130
199	12,712	2,082	976	282	65
200	13,327	2,170	998	390	130
201	12,957	2,387	911	303	173
202	13,195	1,996	1,128	260	151
203	13,037	1,908	997	216	43
204	12,713	2,256	997	282	86
205	13,455	2,083	868	260	65
206	13,125	1,930	1,084	173	86
207	14,132	1,519	1,128	282	65
208	12,425	1,908	975	455	21
209	13,413	2,105	1,085	325	65
210	13,236	2,213	650	238	130
211	13,326	2,430	955	217	65
212	13,373	1,997	1,172	282	173
213	13,107	2,213	1,106	260	43
214	12,599	2,255	758	108	65
215	13,477	1,888	954	238	108
216	14,529	2,106	673	347	86
217	12,428	2,277	997	238	108
218	12,487	1,886	672	281	21
219	12,294	1,951	975	368	86
220	11,813	2,080	932	281	65
221	12,761	2,647	1,128	217	65
222	13,517	1,714	932	260	21
223	14,072	2,367	868	260	21
224	12,314	1,799	1,018	195	43
225	12,472	2,277	954	238	151
226	13,960	1,997	890	390	65
227	12,121	2,233	975	303	43
228	11,884	2,494	1,062	325	108
229	12,056	1,973	1,084	346	65

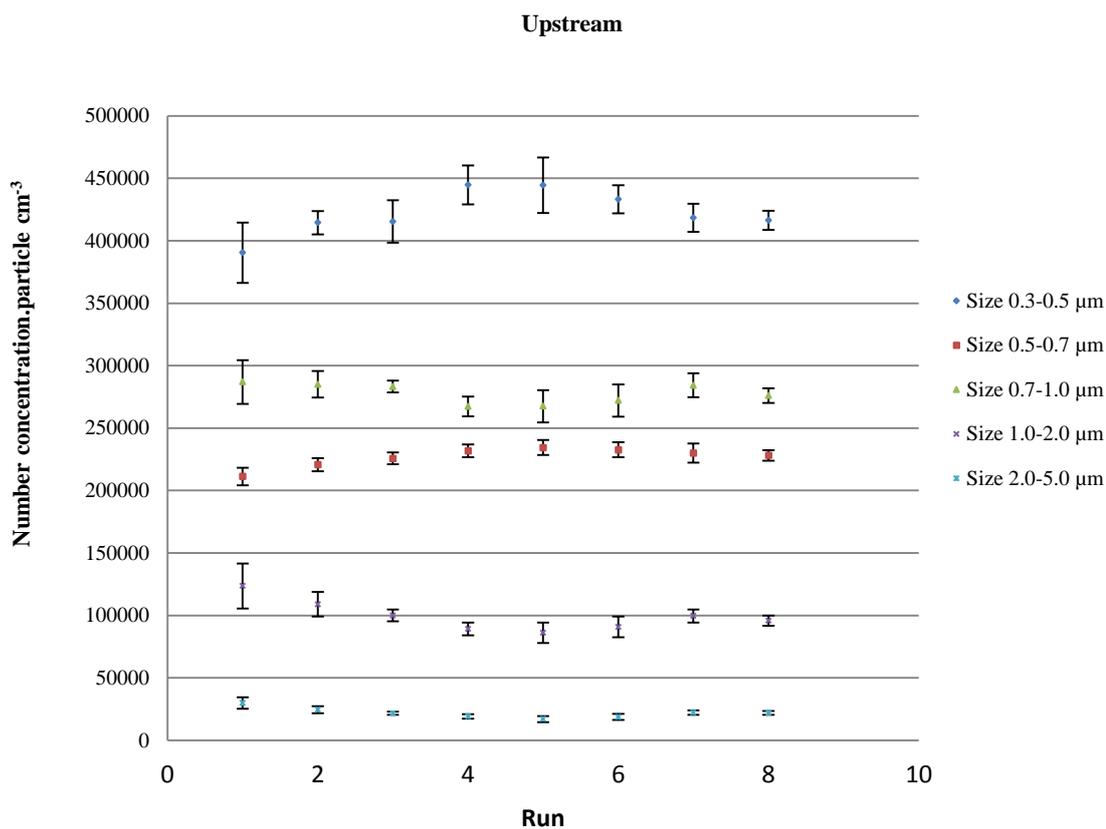
ลำดับ	Number concentration of Particle(particle/cm <sup>2</sup> )				
	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-1.0	1.0-2.0	2.0-5.0
230	13,125	1,974	781	433	65
231	13,473	2,017	715	282	43
232	14,142	2,367	999	347	130
233	13,303	2,083	954	347	86
234	13,056	1,648	845	195	86
235	13,737	1,866	716	303	108
236	13,544	1,996	1,063	260	65
237	12,996	2,104	932	412	65
238	13,108	2,322	911	260	65
239	12,402	1,994	845	303	65
240	13,562	1,866	976	173	21
241	12,096	1,886	888	346	21
242	13,869	1,823	933	195	86
243	13,827	2,214	694	260	130

Average	13,365	2,286	1,164	408	146
STD	624.2259	290.1565	231.3352	149.3565	85.08602
	52.38388	24.34939	19.41322	12.53371	7.14026
upper	102	47	38	24	13
lower	102	47	38	24	13

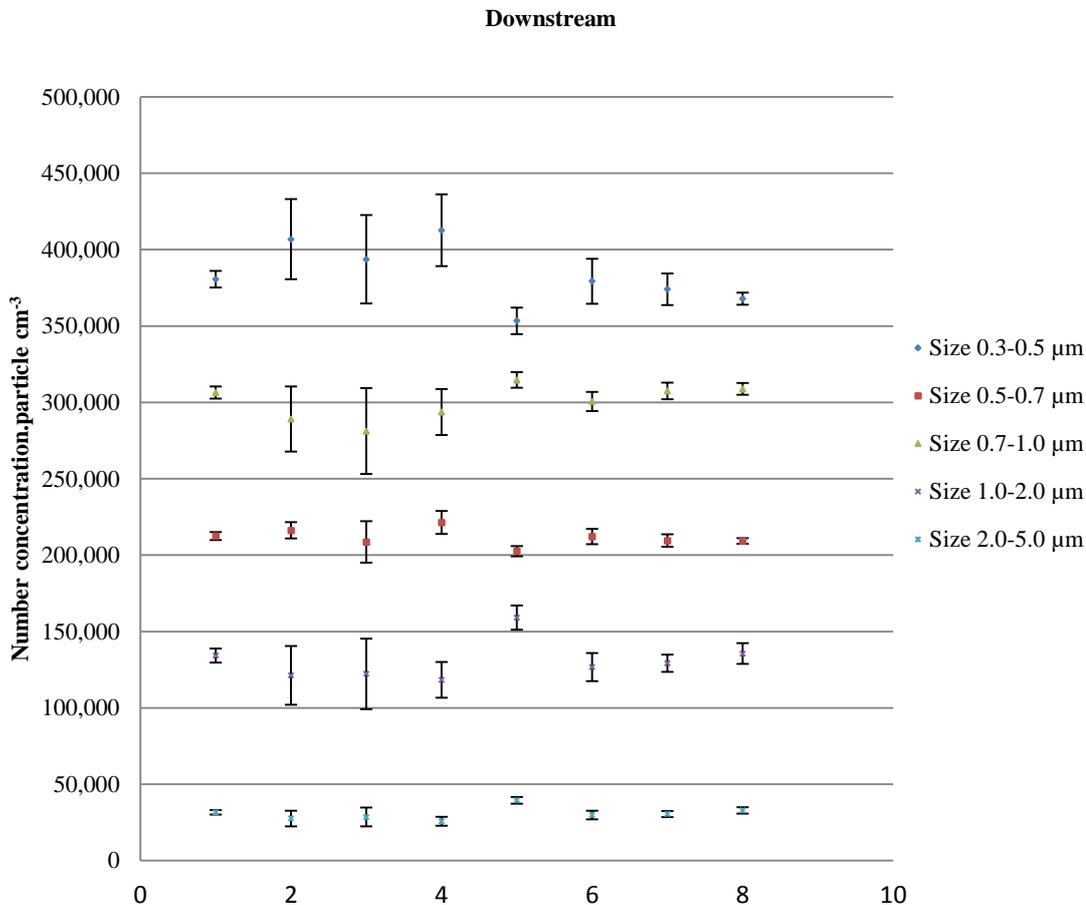


รูป D4.2 แสดง ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคบริเวณทางเข้า และทางออกของเครื่อง  
ตกตะกอนขณะไม่มีการจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อ  
วินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

จากการทดลอง 8 ครั้ง เก็บข้อมูลจำนวนครั้งละ 10 ข้อมูล แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย และการเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อค่าผิดพลาดของค่าเฉลี่ย โดยใช้ช่วงความน่าเชื่อถือ 95 เปอร์เซ็นต์ ผลของค่าที่วัดได้บริเวณทางเข้า และทางออกของเครื่องตกตะกอนที่กระตุ้นด้วยพลาสมา แสดงในกราฟรูป D4.3 และ รูป D4.4 ตามลำดับ



รูป D4.3 แสดง ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคขนาด 0.3-5.0 ไมโครเมตร ช่วงความน่าเชื่อถือ 95 เปอร์เซ็นต์ จากการเผาไหม้บริเวณทางเข้า เครื่องตกตะกอนขณะไม่มีการจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



รูป D4.4 แสดง ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคขนาด 0.3-5.0 ไมโครเมตร ช่วงความนำเชื้อถือือ 95 เปอร์เซนต์ จากการเผาไหม้ บริเวณทางทางออกเครื่องตกตะกอนขณะไม่มี การจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องตกตะกอน ที่ความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

**APPENDIX E**  
**LIST OF PUBLICATIONS**



9<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

## Soot Treatment by Using High Voltage Pulse Energized Electrostatic Precipitator

Nakhorn Thonglek<sup>a\*</sup>, Chanchai Dechthummarong<sup>a</sup> and Tanongkiat Kiatsiriroat<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand*

<sup>b</sup>*Thermal System Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand*

### Abstract

This paper presents the design and construction of the electrostatic precipitator for treated soot from the exhaust pipe by using corona plasma technique that generates from high voltage pulse energizing to excite the electric field between electrodes. Therefore, the electrons between electrodes have energized into high energy in electrode gap. From a comparative study of the field exciting between high voltage pulses energizing and high voltage direct current energizing, it was found that high voltage pulse energizing not only used lower energy but also had higher efficiency. Moreover, the relationship between varying high voltage and treating soot has been discussed.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of CEO of Sustainable Energy System, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT).

**Keywords:** Soot particles; Non-Thermal plasma; Electrostatic precipitator

### 1. Introduction

Electrostatic precipitation (ESP) technology has played an important role in the control of particulate emission from fossil fuel combustion. ESPs generally have very low-pressure drops and low electrical consumption. One of the most recent applications is used to remove soot particles from exhaust gases. Soot particulate matters are carbon particles smaller than 10  $\mu\text{m}$  suspended in the atmosphere for a long

\* Corresponding author. Tel.: +6653-921-444; fax: +6653-213-183.  
E-mail address: [nakhorn\\_th@hotmail.com](mailto:nakhorn_th@hotmail.com).

time [1]-[4] and low resistivity. It is well known that abnormal re-entrainment takes place and collection efficiency drops sharply when electrical resistivity of particles becomes lower than  $10^2$  ohm-m [5]. Then, the efficiency cannot increase by increasing voltage because soot particulate matter has low resistance, including with moisture causes to breakdown which effects to decrease the efficiency of collecting particle carbon.

The consequence, various methods to reduce soot particulate matter developed continually. In this case, negative collection efficiency, where the number of particles of downstream is greater than that of upstream must be studied in an experimental ESP [6], [7]. High-collection-efficiency systems for carbon particles were achieved by using an ESP as an agglomerator [8], [9], and by mixing water mist with gases [7]. Mitchner and Self [10], Kobashi [11], Kildeso et al. [12], and Laitinen et al. [13] studied the effect of bipolar charging on the AC agglomeration efficiency of a parallel plate agglomerator. Watanabe et al. [14] performed experiments with a quadrupole field, in which particles were charged and agglomerated by AC voltage superimposed on DC voltage. Hautanen et al. [15] experimentally investigated the AC agglomeration of unipolar charged particles with both parallel plate and quadrupole agglomerator. Eliasson and Egli [16] proposed an agglomerator based on the increased rate of thermal coagulation due to attractive forces caused by bipolar particle charging. Mitchner and Self [10] carried out a series of experiments to measure the differential charge-to-mass ratio of the particles by corona charging and reported that the charging process became less effective at a higher concentration.

Non-thermal plasma can be generated by applying high-voltage pulses to electrodes with small diameter or sharp edges, and it has been applied in electrostatic precipitator. The plasma is generated by applying high-voltage pulses between the discharges and collecting electrodes. The required voltage to produce the pulsed corona plasma depends on the distance between two electrodes, and the pulses duration. The duration of pulse is less than  $1 \mu\text{s}$ , and rise time is about ten of a nanosecond. Such pulsed voltage can make much higher electric fields during pulse without causing spark breakdown as in the electrostatic precipitator [17].

The aim of this study is to improve the treatment efficiency of soot particles flowing into an ESP energized by high-voltage pulse power and compare results with those achieved when a DC supply is used.

## 2. Experiment

### 2.1. Experimental setup

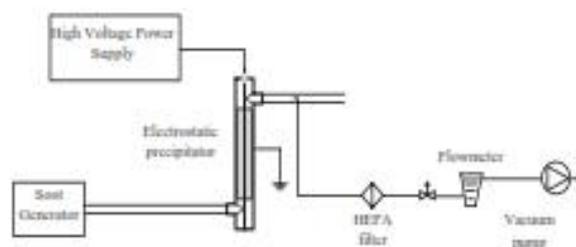


Fig. 1. Experimental system schematic diagram.

### 2.3. High voltage pulse power supply

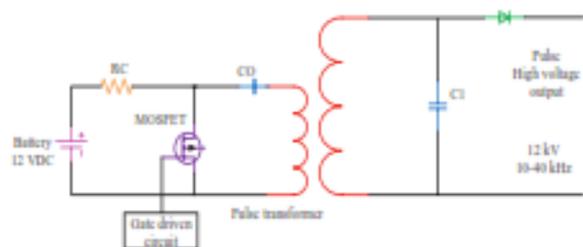


Fig. 3. The circuit diagram of the pulse power supply.

The circuit diagram of the pulse power supply is shown in Fig. 3. The DC voltage 12 V from battery was stepped up to 12 kVac by a pulse transformer with frequency range around 10 to 40 kHz. Rise time and pulse wide are 400 ns, and 500 ns, respectively. Then, the high voltage AC from the pulse transformer was rectified DC pulse by a high voltage diode before supplying to the ESP.

### 3. Results and discussion

The V-I characteristics of the ESP are shown in Fig. 4. On energized negative DC to the ESP, the corona occurred on set voltage 4 kV and the current gradually increased with quadratic function of voltage. When supplying voltage was higher than 7 kV, the spark took place between the tungsten wire and the inside cylindrical tube of the electrostatic precipitator. However, when the power supply was replaced by the prototype of high voltage pulse power supply as shown in Fig. 3, although the current gradually increased with quadratic function of voltage as same as energized negative DC supply, the corona discharged on the tungsten wire began at 5 kV. Nevertheless, the peak voltage of the DC high voltage pulse can rise up to be higher than 7 kV without spark.

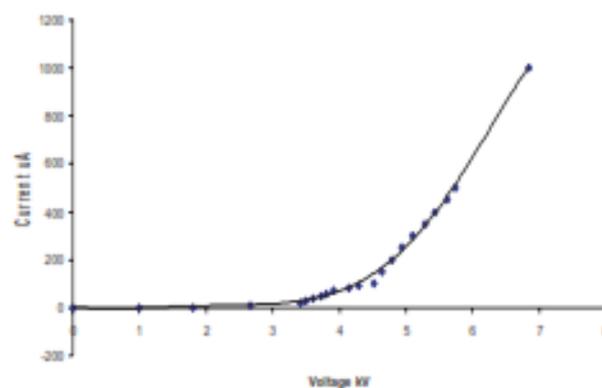


Fig. 4. V-I Characteristics.

The total removal efficiency for the ESP as a function of both DC and pulse voltage conditions was shown in Fig. 5. The results indicate that total removal efficiency was effective higher than 50% when the

corona discharges occurred on the tungsten wire in the ESP. The total removal efficiency was increased while the voltage was increased. Because the electric force on the soot particles was increased by increasing electric field intensity, the collecting particle carbons from exhaust gases also increased. Unfortunately, the voltage must not exceed 7 kV before the breakdown in the DC condition. However, the pulse voltage conditions can increase higher than 7 kV without spark. Consequently, the total removal efficiency can be increased up to 90% by increasing the peak pulse voltage up to 9 kV before the breakdown occurred in the same configuration of the ESP.

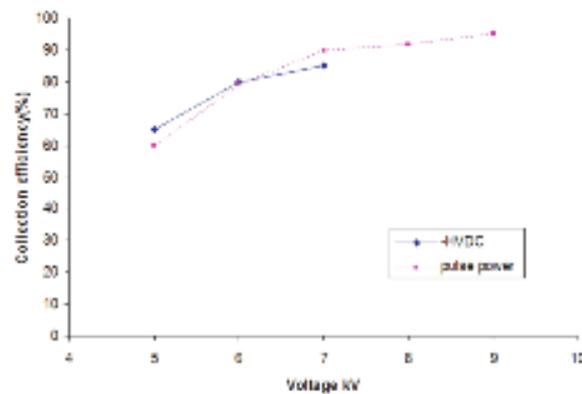


Fig. 5. Collection efficiency as a function of peak voltage.

The collection efficiency as a function of operation time up to 50 min was shown in Fig. 6. The collection efficiency for energized DC decreased with increasing operating time. The collection efficiency for energized pulse also decreased with increasing operating time and became constant at the end. In DC supply condition, it also found that the collection efficiency decreased when the soot particles accumulated on the tungsten wire increased. But from pulse power supply, there were no more carbon particles accumulated on the tungsten wire in the long run.

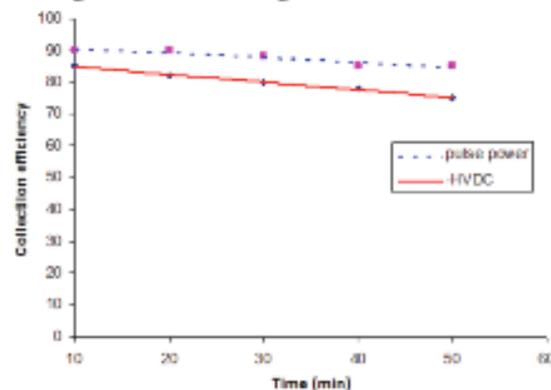
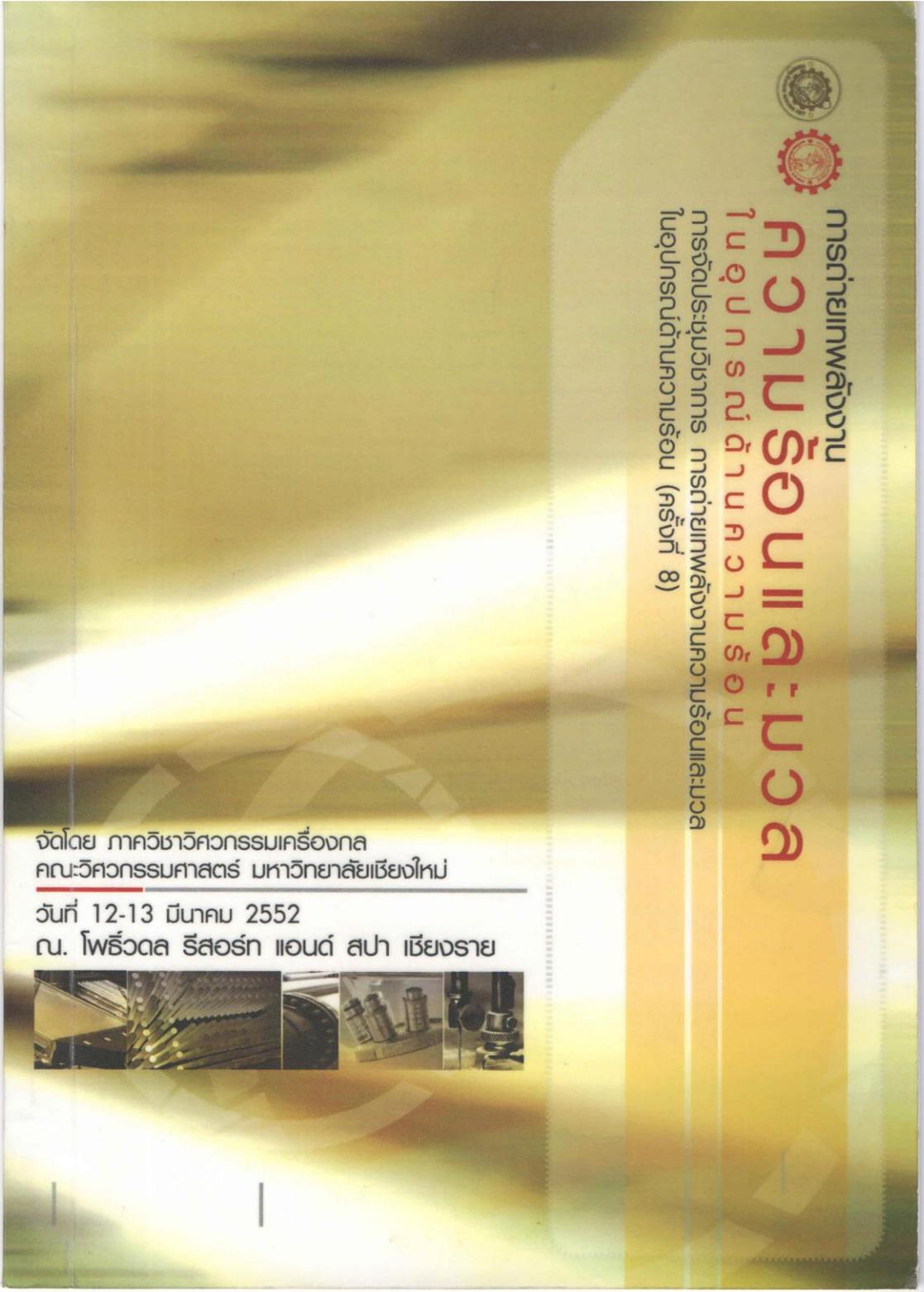


Fig. 6. Collection efficiency as a function of ESP operating time for 50 min.

## References

- [1] David, B. Kittelson, 1998. Engines and Nanoparticles: A Review *J. Aerosol Society*, 29(5/6): 575-588.
- [2] Sagai, M. 2001. Health Effects of Diesel Exhaust Particles (Ambient Fine Particles (PM 2.5) and Diesel Exhaust Particles) *Japan Society of Atmospheric Environment* 41: 58-61.
- [3] Takahashi, T. 2000. Research for Fine Particle and Further Perspective (Ambient Fine Particles (PM 2.5) and Diesel Exhaust Particles) *Japan Society for Atmospheric Environment* 41: 66-70.
- [4] Yokota, H. 2000. Diesel Exhaust Gas and SPM (Present Status and Problem of SPM and PM2.5) *Japan Society for Atmospheric Environment* 41: 92-93.
- [5] White, H.J. (1962). *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley Publishing Co., Ltd
- [6] Ito, T., Kubota, T., Zukeran, A., Takeo, K. Shinkai, and Miyamoto, M. Collection 1995. characteristics of submicron particles on electrostatic precipitator, *Journal of Inst. Elect. Install. Eng. Japan*. 15(2): 113–120.
- [7] Zukeran, A. Ito, T. Takahashi, T. and Kawakami, H. 1996. Effect of water on agglomeration and collection efficiency in electrostatic precipitator, *Journal of Inst. Elect. Install. Eng. Japan*, 16(12): 1288–1296.
- [8] Isahaya, N. 1967. Development on electrostatic pre-coagulator combined with after-cyclone dust collector, *J. Hitachi-Hyoron* 49: 77.
- [9] Masuda, S. Moon, J. D. and Aoi, K. 1980. AUT-AINER precipitator system-An effective control means for diesel engine particles, *Actas 5 Congreso Int. Aire Puro*, Tomo 2: 1149–1153.
- [10] Mitchner, M. Self, S. (1983). Basic studies to reduce electrostatic precipitator size and cost, EPRI Report CS3226.
- [11] Kobashi M. (1978). Particle agglomeration induced by alternating electric fields, Ph.D. Thesis, Stanford University.
- [12] Laitinen, A. Hautanen, J. Keskinen, J. Kauppinen, E. Jokiniemi, J. Lehtinen, K. 1996. Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar gas flow, *Journal of Electrostatics* 38: 303-315.
- [13] Kildeso, J. Bhatia, V.K. Lind, L. Johnson, E. Johansen, A. 1995. An Experimental investigation for agglomeration of aerosols in alternating electric fields, *Aerosol Science Technology* 22: 422-430.
- [14] Watanabe, T. Tochikubo, F. Koizumi, Y. Tsuchida, T. Hautanen, J. Kauppinen, E. 1995. Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator, *Journal of Electrostatics* 34: 367-383.
- [15] Hautanen, J. Kilpelainen, M. Kauppinen, E.I. Jokiniemi, J. Lehtinen, K. 1995. Electrical agglomeration of aerosol particle in an alternating electric field, *Aerosol Sci. Technol.* 22: 181-189.
- [16] Eliasson, B. Egli, W. 1991 Bipolar coagulation-modeling and applications, *Aerosol. Sci. Technol.* 22: 429-440.




**การถ่ายทอดผลงาน**  
**ความรู้รอบแ ละ มวล**  
**ไข่อุปกรณ์ด้านความร้อน**  
การจัดประชุมวิชาการ การถ่ายทอดผลงานความรู้และเทคโนโลยี  
ในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8)

จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วันที่ 12-13 มีนาคม 2552  
ณ. โพธิ์วัดล ธิสอร์ท แอนด์ สปา เชียงราย



การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8)  
วันที่ 12-13 มีนาคม 2552 โรงแรมโพซิวดล รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดเชียงราย

## การรวมตัวกันของอนุภาคดีเซลโดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงสนามไฟฟ้า ภายใต้โคโรนาพลาสมา AGGLOMERATION OF DIESEL PARTICLES USING AN ELECTROSTATIC PRECIPITATOR UNDER CORONA PLASMA

นคร ทองเล็ก

อนินชา รุ่งโรจน์วัฒนศิริ

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มุ่งหมายที่จะศึกษาลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซลโดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตภายใต้โคโรนาพลาสมา โดยได้ทำการทดลองในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสายแผ่นกับอิเล็กโทรดปล่อยประจุลักษณะพื้นเลื่อยที่กระตุ้นด้วยแรงดันสูงแบบพัลส์ ความถี่ 15 kHz ระดับแรงดัน 22 kVp ขั้วลบ เมื่อผ่านก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลเข้าไปเครื่องตกตะกอน อนุภาคดีเซลขนาดเล็กจะถูกทำให้รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยโคโรนาพลาสมา ด้วยอัตราการไหลของอากาศที่สูงสุดที่ 8 L/min มีค่าพลังงานอินพุตจำเพาะ เป็น 35.5 J/L ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซล โดยที่อัตราการไหล 8 L/min นั้นจะมีลักษณะเป็นก้อนเดี่ยวหลายขนาด ส่วนที่อัตราการไหล 2 L/min นั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นที่มีกิ่งก้านสาขาจำนวนมาก

คำสำคัญ: การรวมตัวกัน, โคโรนาพลาสมา, อนุภาคดีเซล, เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

### 1. บทนำ

ก๊าซไอเสียจากรถยนต์ดีเซลเป็นสาเหตุหนึ่งของมลพิษทางอากาศ เนื่องจากมันปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร และ NOx และก๊าซซัลเฟอร์อื่นๆ อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ได้มีการพัฒนาตัวกรองอนุภาคดีเซลที่ทำจากเซรามิกเพื่อทำการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กจากไอเสียดีเซล [1] แต่ยังคงพบปัญหาในหลายด้าน ดังเช่น ความดันตก ประสิทธิภาพต่ำสำหรับอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตร และอายุการใช้งานสั้น

เนื่องจากอนุภาคดีเซลเป็นคาร์บอนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า  $10^2$  โอห์ม-เมตร [2] จึงอัดประจุได้น้อยและคายประจุได้รวดเร็ว ดังนั้นเมื่ออนุภาคที่มีประจุถูกผลักให้เคลื่อนตัวตกตะกอนลงที่อิเล็กโทรดกักเก็บ อนุภาคจะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุเหมือนกันกับอิเล็กโทรดกักเก็บ และจะถูกผลักให้กระดอนออกไปในกระแสแก๊สเพื่อทำการอัดประจุใหม่อีก ทำให้เกิดการกระดอนไปมาบนแผ่นอิเล็กโทรดกักเก็บ และเคลื่อนตัวไหลออกจากเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ทำให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคดีเซลลดลง [3] จึงได้ทำการพัฒนาการเพิ่มความสามารถในการกำจัดอนุภาคดีเซลของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยเทคนิคพลาสมาขึ้น โดยการทำให้อนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาที่มีอิเล็กโทรดปล่อยประจุรูปพื้นเลื่อยวางอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างอิเล็กโทรดกักเก็บแผ่นราบด้วยการกระตุ้นโดยแรงดันสูงแบบพัลส์ ที่มีความกว้างพัลส์น้อยกว่าไม

โครวินาทีทำให้เกิดการปล่อยประจุพลาสมา สตรีมเมอร์พลาสมาเกิดจากอิเล็กตรอนความเร็วสูงชนกับโมเลกุลของก๊าซ ประกอบด้วยประจุไฟฟ้าบวกและลบจำนวนมาก และแสง UV คลื่นเสียง และการสั่นทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้อนุภาคดีเซลรวมตัวกันได้

ในการบทความนี้ เราได้ทำการทดลองลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซลโดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตภายใต้โคโรนาพลาสมาเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศ

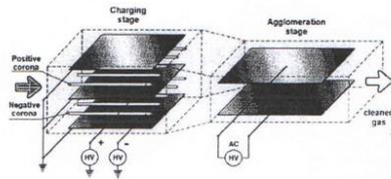
### 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคนิคการทำให้อนุภาครวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่

การทำให้อนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น หรืออนุภาคขนาดเล็กไปเกาะติดกับอนุภาคขนาดใหญ่ สามารถทำได้โดยการใช้คลื่นเสียง [4] และการควบแน่นของไอน้ำ [5] แต่วิธีการนี้สิ้นเปลืองพลังงานมาก จากการศึกษาโดย Stairmand [6] ได้ประมาณการทำให้อนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตขนาดใหญ่ รวมกันเป็นก้อนด้วยผลทางคลื่นเสียงนั้นต้องใช้พลังงานถึงเมกะวัตต์ ก้อนอนุภาคทั้งหมดอาจมีบางส่วนไปไม่เสถียรหรือยังรวมกันไม่หมดกว่าจะไปถึงขั้นตอนการตกตะกอน ส่วนการควบแน่นไอน้ำก็มีประสิทธิภาพแต่ก็ยังใช้พลังงานมากเช่นเดียวกัน

ได้มีการนำเสนอใช้เทคนิคการทำให้อนุภาคดีเซลรวมตัวกันด้วยไฟฟ้าสถิตกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร ขณะทำงานจะมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงมาก [7, 8] ปกติอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรนั้น

ทำให้รวมกันเป็นก้อนโดยการอัดประจุอย่างมาก อย่างไรก็ตามสามารถทำได้เทคนิคโคโรนาพลาสมา โดยแอมแกรมของเครื่องดังแสดงในรูปที่ 1 ในขั้นตอนแรก อนุภาคจะถูกอัดประจุโดยมีขั้วต่างกัน และในขั้นตอนที่สองจะเป็นการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะทำให้อนุภาคตกตะกอนได้ เครื่องรวมอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นมีแบบต่างๆ มีดังนี้ Bipolar Parallel-plate Agglomerator ทดสอบโดย Kobashi และ Mitchner และ Self [9] อนุภาคจะถูกอัดประจุบวกและอัดประจุลบ แล้วทำให้รวมตัวกันเป็นก้อนด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับ สามารถทำให้ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ Unipolar Alternating Electric Field Agglomerator [9,12,13] อนุภาคจะถูกอัดประจุให้มีขั้วเดียวกัน จากนั้นทำให้สั่นด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ แอมป์ลิจูดของการสั่นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดและมวลของอนุภาคโดยจะมีขนาด 100 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคขนาด 0.1-1 ไมโครเมตร อนุภาคจะตกตะกอนและรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่เคลื่อนที่แบบสั่นเนื่องจากประจุและการเคลื่อนตัว ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร ลดลงต่ำกว่า 19 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้น ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร เพราะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรนั้นแอมป์ลิจูดของการสั่นจะเพิ่มตามขนาดของอนุภาค ขนาดของก้อนอนุภาคนั้นสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มความถี่ ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ความถี่ 50 Hz ก้อนอนุภาคจะมีขนาด 1 ถึง 8 ไมโครเมตรแต่ถ้าเพิ่มความถี่เป็น 300 Hz ก้อนอนุภาคจะโตขึ้นเป็น 30 ถึง 50 ไมโครเมตร [13] Bipolar AC/DC Agglomerator [14] อนุภาคจะถูกอัดประจุแบบสองขั้วจากการปล่อยประจุโคโรนาในแบบกระแสสลับ แล้วผ่านเข้าไปรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้นในสนามไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นเข้าสู่การตกตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตรสูงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.03 ไมโครเมตร Quadrupole Agglomerator เสนอโดย Watanade และ Suda [9] โดยการอัดประจุตรงแก่กลางของแท่งอิเล็กโทรดสี่แท่ง ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคขนาด 0.06 ถึง 1 ไมโครเมตรลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และการอัดประจุประมาณ 1 mC/kg Nakajima และ Sato [15] ได้ใช้แท่งอิเล็กโทรดสองแท่ง กับอิเล็กโทรดแบบแผ่น อีก สองแผ่น โดยใช้แรงโพลาริไซซ์ไม่มีการอัดประจุให้กับอนุภาค แต่ใช้การกระตุ้นทางเสียง ในกรณีการอัดประจุให้กับอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อมันรวมตัวกันขนาดใหญ่ขึ้นแล้วมีสภาพเป็นกลางจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมตัวกันลดลง



รูปที่ 1 โดอะแกรมของเครื่องรวมอนุภาคเป็นก้อนขนาดใหญ่[9]

ประสิทธิภาพการรวมตัวกันของอนุภาคมีข้อจำกัด เนื่องจากการสลายตัวของประจุซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคทั้งสองมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากันแต่ต่างขั้วกัน ทำให้มันมีสภาพเป็นกลางไม่สามารถไปรวมกับอนุภาคอื่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไปได้อีก [12] เครื่องรวมตัวอนุภาคดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น อนุภาคจะได้รับการอัดประจุด้วยการปล่อยประจุโคโรนากระแสตรง หรือโคโรนากระแสสลับ คล้ายกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเก่า แต่เครื่องรวมตัวอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิตช่วยทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น และทำให้มันตกตะกอนได้ง่ายด้วยเครื่องตกตะกอนเชิงสนามไฟฟ้าแบบเก่า หรือไซโคลอน

2.2 สติมเมอร์พลาสมา

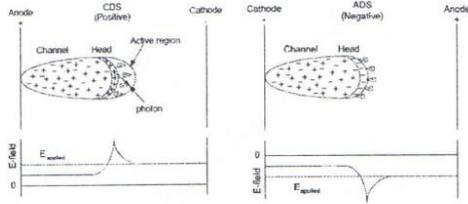
การเกิดขึ้นของสติมเมอร์พลาสมาที่มีจุดเริ่มต้นใกล้กับอิมิตเตอร์อิเล็กโทรด และเคลื่อนที่ตรงไปยังคอลเลคเตอร์อิเล็กโทรด ดังได้มีการอธิบายโดย T.M.P. Briels [16], E.H.R. Gaxiola[17] และ J.T. Kennedy[18] ถึงความเข้าใจโครงสร้างของสติมเมอร์โดยแบ่งขั้นตอนของพลาสมาออกเป็นสามขั้นตอนนี้ ขั้นตอนแรก คือการเริ่มเกิดอะวาลานซ์ ขั้นตอนที่สองคือการเคลื่อนที่ของสติมเมอร์ และขั้นตอนที่สามคือการเกิดกระบวนการซ้ำหลังจากที่สติมเมอร์ผ่านช่องอากาศดังจะกล่าวต่อไปนี้

การเริ่มสติมเมอร์นั้นต้องมีอิเล็กตรอนอิสระประมาณ  $10^6 - 10^8 \text{ electron/cm}^3$  ซึ่งอาจเกิดขึ้นรอบตัวเราโดยรังสีคอสมิก และอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากก๊าซลบ(Electronegative gasses) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งมาโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการไอออไนซ์ด้วยการชนของอิเล็กตรอน ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าเพิ่มเป็นสองกลุ่ม ซึ่งจะถูกร่งด้วยสนามไฟฟ้า ขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนตัวภายใต้สนามไฟฟ้านั้น อาจเกิดการไอออไนซ์โดยการชนขึ้นอีกเป็นทวีคูณ ในทางฟิสิกส์มักจะแทนด้วยสัมประสิทธิ์ของทาวน์เซนด์ (Townsend coefficient,  $\alpha$ ) ซึ่งแสดงจำนวนการเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชัน ของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่เคลื่อนที่ในระยะทางหนึ่งเซนติเมตรในทิศทางสนามไฟฟ้า

ผลของการเกาะติดจะทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน สามารถแทนด้วยสัมประสิทธิ์การเกาะติด(Attachment coefficient;  $\eta$ ) ซึ่งหมายถึงจำนวนการเกาะติดต่อระยะหนึ่งเซนติเมตรที่เคลื่อนตัวในทิศทางสนามไฟฟ้า ทั้ง  $\alpha$  และ  $\eta$  ขึ้นอยู่กับความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นก๊าซ ผลต่างของทั้งสองคือ  $(\alpha - \eta)$  สัมประสิทธิ์การไอออไนซ์รวม (net-ionization;  $\bar{\alpha}$ ) ถ้า  $\bar{\alpha} > 0$  จำนวนอิเล็กตรอนจะมีการเพิ่มเป็นแบบเอกโปเนนเชียล ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ แต่ถ้า  $\bar{\alpha} < 0$  จะไม่เกิดการปล่อยประจุเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนลดลง ในอากาศที่อุณหภูมิและความดันปกติ (NTP:293 K, 1 bar) ต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 30kV/cm ในการทำให้  $\bar{\alpha} > 0$

อิเล็กตรอนอะวาลานซ์จะสร้างสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยตัวเองเนื่องจากอิเล็กตรอนและไอออนบวกเคลื่อนตัวสวนทางกัน การศึกษาที่ผ่านมาโดย J.M. Meek [19], H. Raether[20] แสดงให้เห็นว่า ที่ NTP ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากถึง  $10^8 - 10^9$  ตัว แล้วขนาดของสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเท่ากับสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ สำหรับการเปลี่ยนจากอะวาลานซ์เป็นสติมเมอร์นั้นปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาโดย

C. Montijn [21,22] แสดงให้เห็นว่านอกจากการพิจารณารูปทรงการเคลื่อนที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขสำหรับการเปลี่ยนเป็นสตรีมเมอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ และค่าวิกฤต ของประจุค้างซึ่งมีค่าประมาณ  $10^8 - 10^9$  ตัว



รูปที่ 2 แสดง สตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด (CDS) และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด (ADS) และแสดงสตรีมเมอร์สนามไฟฟ้ารวม [26]

สตรีมเมอร์มีลักษณะเป็นการเพิ่มสนามไฟฟ้าขนาดใหญ่ ในบริเวณหัวสตรีมเมอร์ตามการเคลื่อนที่ การเพิ่มสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การไอออไนซ์สุทธิ  $\alpha$  มีค่าเป็นบวก ต่อมาอิเล็กตรอนใหม่ถูกสร้างขึ้นจำนวนมากตรงบริเวณส่วนหัวสตรีมเมอร์ การเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ จะไปตามทิศทางของการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้า ผลทำให้เกิดช่องนำกระแสสตรีมเมอร์ขึ้น จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ S.K. Dhali and P.F. Williams [23] ,U. Ebert และคณะ [24] ,C. Montijn [25] ได้แสดงให้เห็นว่าหัวสตรีมเมอร์เป็นปลอกบางล้อมรอบปลายของช่องสตรีมเมอร์ ในปลอกดังกล่าวนี้แรงแดดของความหนาแน่นประจุสุทธิมีค่ามาก ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นมีค่าสูงถึง 250kV/cm รูปที่ 2 แสดง สตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด (CDS) และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด (ADS) แสดงสตรีมเมอร์สนามไฟฟ้ารวม สนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย  $E_{applied}$  คงที่ภายในช่องคือพลาสมา (Quasi-neutral plasma) ซึ่งมีสนามไฟฟ้ารวมต่ำกว่าสนามไฟฟ้า  $E_{applied}$  ทิศทางของหัวสตรีมเมอร์ สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นของประจุค้าง แต่ที่ระยะห่างออกไปมากสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่า  $E_{applied}$  ขนาดของหัวและบริเวณแอคทีฟ จะมีการเพิ่มมากกว่าเมื่อเทียบกับช่องสตรีมเมอร์ ดังนั้นบริเวณแอคทีฟและหัวสตรีมเมอร์ไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน ภาพล่าง ผลของการจำลองเชิงเลขโดย Montijn [2.12] การจำลองสตรีมเมอร์ขั้วลบในไนโตรเจนบริสุทธิ์ ภายใต้สนามไฟฟ้าเอกรูป ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำสุดสำหรับการสร้างสตรีมเมอร์ ในอากาศมีค่าประมาณ  $10^2 - 10^3$  kV/cm ดังนั้นสนามไฟฟ้าความเข้มสูงสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดที่มีความไม่เอกรูปสูง การกระตุ้นด้วยแรงดันสูงแบบพัลส์แคบ เพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ที่สมบูรณ์ที่ช่องอากาศ ถ้าสนามไฟฟ้าในบริเวณอิเล็กโทรดที่มีปลายแหลมมีค่าเกินค่าเริ่มเกิดแล้วจะเกิดสตรีมเมอร์ขึ้น สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำหัวสตรีมเมอร์ ทำให้สตรีมเมอร์ขยายตัวออกไปได้อย่างต่อเนื่อง

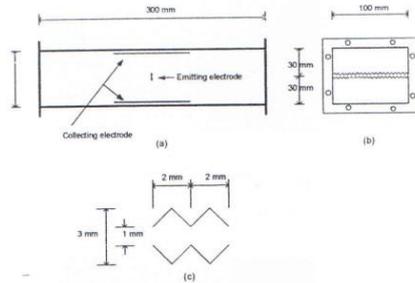
การเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของสตรีมเมอร์ มีความสำคัญในการสร้างอิเล็กตรอนอิสระขึ้นใหม่เพื่อพัฒนาไปสู่เวลาสั้นซีก ตรงจุดนี้เราจะแบ่งสตรีมเมอร์ออกเป็นสองแบบคือ สตรีมเมอร์ในทิศทางแคโทด CDS และสตรีมเมอร์ในทิศทางแอโนด ADS ดังแสดงในรูปที่ 2 มีความแตกต่างกันตรงที่การต่อขั้วแรงดันไฟฟ้าเข้ากับอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือแอคทีฟอิเล็กโทรด ความแตกต่างหลักระหว่าง (CDS) กับ (ADS) เมื่อพิจารณาตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย CDS นั้นมีทิศทางขนานไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ขณะที่ ADS นั้นสวนทางกับสนามไฟฟ้าแต่มีข้อดีตรงที่มีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ขณะที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกสร้างที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ และถูกเร่งให้เคลื่อนตัวไปในทิศทางของสตรีมเมอร์

สำหรับ CDS นั้นมีความยุ่งยากมากกว่าเพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสวนทางกับสตรีมเมอร์ ดังนั้นกลไกการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของ CDS นั้นต้องมีการสร้างอิเล็กตรอนอิสระในปลอกบางส่วนหน้าของสตรีมเมอร์ และถูกเร่งเข้าสู่หัวสตรีมเมอร์ ถ้าอิเล็กตรอนเกิดขึ้นห่างจากหัวสตรีมเมอร์มาก สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าทำให้สัมประสิทธิ์การไอออไนซ์สุทธิมีค่าเป็นบวก บริเวณที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเวลาสั้นซีกขึ้นมาใหม่คือบริเวณแอคทีฟแสดงในรูปที่ 2 จากการบันทึกของ S.Badaloni และ I. Gallimberti [26] , I. Gallimberti [27]

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระภายในบริเวณแอคทีฟนั้นคือโฟโตไอออไนเซชัน โฟตอนที่เกิดขึ้นจากหัวสตรีมเมอร์สามารถไอออไนซ์โมเลกุลในระยะใกล้ได้ เมื่อเกิดสตรีมเมอร์ซ้ำขึ้นอีกยังทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอีก สตรีมเมอร์จะเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องในช่องอากาศ เมื่อสนามไฟฟ้าตรงส่วนหัวสตรีมเมอร์มีค่ามากพอ ก็จะทำให้สัมประสิทธิ์ไอออไนซ์สุทธิมีค่าเป็นบวก เมื่อจ่ายแรงดันสูงมากพอที่จะทำให้ช่องสตรีมเมอร์คงอยู่บริเวณหลังของหัวสตรีมเมอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 5-8.5kV/cm สำหรับ CDS ในอากาศ [27,28,29] สำหรับ ADS สนามไฟฟ้าเสถียรนั้นมีค่าประมาณ 12kV/cm ในการกระตุ้นรีเอคเตอร์นั้นจะเห็นว่าการทำงานให้เกิด ADS จะต้องใช้แรงดันสูงกว่า [29] นอกจากนั้นขนาดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสตรีมเมอร์ยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของก๊าซและลักษณะโครงสร้างของรีเอคเตอร์

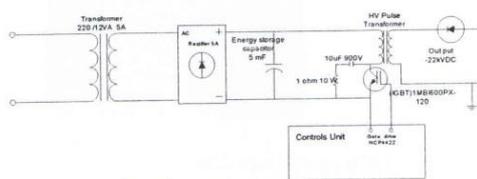
อิเล็กตรอนความเร็วสูงชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดไอออไนเซชัน และสตรีมเมอร์พลาสมาประกอบด้วยไอออนบวกและลบจำนวนมาก และแสง UV อีกทั้งยังมีคลื่นเสียงจากพลาสมา และการสั่นทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ให้เกิดการรวมกันของอนุภาคขนาดเล็กหรือการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่ ภายใต้สตรีมเมอร์พลาสมา

3. เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ



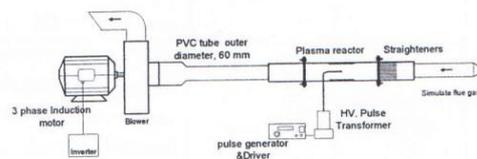
รูปที่ 3 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

รูปที่ 3 แสดงเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบสายแผ่นที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดรูปฟันเลื่อยที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ความสูงของฟัน 1 มิลลิเมตร ระยะฟัน 2 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร วางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดกักเก็บโดยระยะห่างด้านละ 30 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดกักเก็บทำจากแผ่นสแตนเลส 100 x 120 ตารางมิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 เครื่องกำเนิดแรงดันสูงแบบพัลส์

รูปที่ 4 แสดงเครื่องกำเนิดแรงดันสูงแบบพัลส์ สำหรับสร้างไฟฟ้าแรงสูงกระตุ้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าทำการลดระดับแรงดันลงจากแหล่งจ่ายลงจาก 220 โวลต์ กระแสสลับเป็น 12 โวลต์กระแสสลับ และชุดเรียงกระแสทำหน้าที่แรงกระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้า สวิตช์และชุดควบคุมทำหน้าที่ควบคุมการปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้า แบบพัลส์ โดยสามารถปรับความกว้างและความถี่ของพัลส์ได้ หม้อแปลงไฟฟ้าพัลส์แรงสูง เป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงระดับแรงดันพัลส์จาก 12 โวลต์ ให้สูงขึ้นเป็น 22 กิโลโวลต์ขั้วลบ สำหรับกระตุ้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยทำการต่อเข้ากับอิเล็กโทรดอิเล็กโทรด ส่วนอิเล็กโทรดกักเก็บต่อกับกราวด์



รูปที่ 5 แผนภูมิรูปภาพชุดทดลอง

รูปที่ 5 แสดงวิธีการทดลอง ก๊าซไอเสียดีเซลจำลองขึ้นจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ตะกั่วเมานัตเซล ด้วยการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ก๊าซประกอบด้วยอนุภาคเป็นจำนวนมาก ทางออกของระบบประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสสลับสามเฟสที่สามารถปรับความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ ทำให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ สูงสุด 10 ลิตรต่อนาที

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าสำหรับวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใช้ออสซิลโลสโคป(Tektronix TDS 210) และโพรบวัดไฟฟ้าแรงสูง 30กิโลโวลต์ ใช้แผ่นกรองสำหรับเก็บตัวอย่าง

ในบทความนี้ได้ใช้หน่วยของพลังงานอินพุตเฉพาะ(Specific Input Energy, SIE) (1) เป็นตัวประเมินความสามารถ โดยค่า SIE มีนิยามเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ไปต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซ

$$SIE [J/L] = \frac{\text{Electrical Input Power [J/L]}}{\text{Gas Flow Rate [L/s]}} \quad (1)$$

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 ลักษณะเบื้องต้นของปฏิกรณ์พลาสมา

รูปที่ 6 แสดงลำพลาสมาที่พุ่งออกจาก อิเล็กโทรดอิเล็กโทรดเข้าสู่อิเล็กโทรดกักเก็บด้านบนและด้านล่างเป็นการปล่อยประจุโคโรนาพลาสมาที่มีความถี่ 15 KHz แรงดันขั้วลบ 22 kVp



รูปที่ 6 แสดงสตรีมเมอร์พลาสมาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

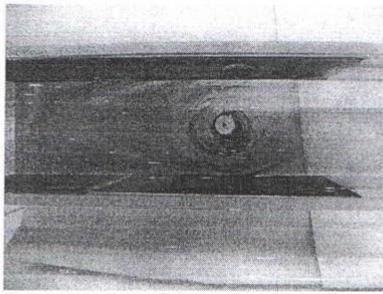
ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดันและกำลังของพลาสมา ในการทดลองนี้ความถี่ 15 KHz คงที่ และความกว้างพัลส์ 1 ไมโครวินาทีคงที่ เมื่อทำการปรับแรงดันจนถึง 17 kVp เริ่มสังเกตเห็นลำพลาสมา แล้วทำการเพิ่มระดับแรงดันจนถึง 28 kVp

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับแรงดันและกำลังของพลาสมา

ระดับแรงดันไฟฟ้า (kVp)	กำลังไฟฟ้าพลาสมา (W)
17	0.40
20	0.70
22	2.72
24	5.62
25	9.66
28	15.55

4.2 ลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซล

รูปที่ 7 แสดงการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพลาสมา อนุภาคดีเซลถูกทำให้รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

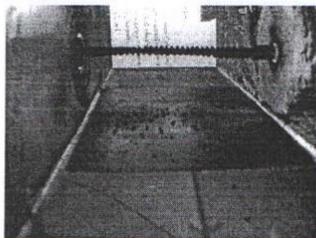


(ก)



(ข)

รูปที่ 7 แสดงการไหลของก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพลาสมา (ก) ที่อัตราการไหล 8 L/min (ข) 2 L/min

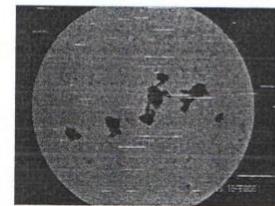


(ก)

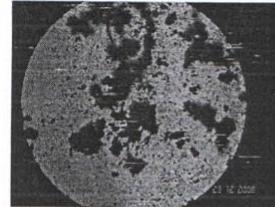


(ข)

รูปที่ 8 แสดงอนุภาคดีเซลขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนบริเวณ (ก) อิเล็กโทรดกักเก็บ (ข) ท่อ PVC



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 แสดงภาพขยาย 500 เท่าของอนุภาคดีเซลที่รวมตัวกันพลาสมา (ก) ที่อัตราการไหล 8 L/min (ข) 2 L/min

ตารางที่ 2 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซล

อัตราการไหล [L/min]	พลังงานอินพุตจำเพาะ [J/L]	ลักษณะการรวมตัวกัน
8	35.5	การรวมตัวกันมีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาดต่างๆ โดยมีขนาดโตสุด 2 มิลลิเมตร ตกตะกอนที่แผ่นอิเล็กโทรดกักเก็บ
4	142.5	มีการรวมตัวกันเป็นเส้นใยจำนวนมาก และเคลื่อนตัวไปตกตะกอนในท่อพีวีซี
2	360	เป็นเส้นใยยาว และจำนวนมากไหลวน บริเวณอิเล็กโทรดทั้งสองและเชื่อมต่ออิเล็กโทรดเข้าด้วยกันทำให้เกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซลโดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงสนามไฟฟ้าภายใต้โคโรนาพลาสมา ที่กระตุ้นด้วยพัลส์ความถี่ 15 kHz แรงดัน 22 kVp ขั้วลบเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของอากาศที่ ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาคดีเซล โดยที่อัตราการไหล 8 L/min นั้นจะมีลักษณะเป็นก้อนเดี่ยวหลายขนาด ส่วนที่อัตราการไหล 2 L/min นั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นที่มีกิ่งก้านสาขาจำนวนมากและขนาดใหญ่กว่า

### เอกสารอ้างอิง

- [1.] [Toshiaki Yamamoto, Masaaki Okubo, Tomoyuki and Yukio Miyairi, "Nonthermal Plasma Regeneration of Diesel Particulate filter", SAE Technical paper, SP-1759, No.2003-01-1182.
- [2.] H.J. White, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley Publishing Co., 1962.
- [3.] Satoshi Sato, Yoshihiko Matsui, Azunori Takashima, Shinji Katura and Akira Mizuno, "Diesel particle separation and collection using coaxial double tube plasma reactor", Proc. Of 2003 Annual Meeting of The Institute of Electrostatics Japan, September 11-12, 2003 (in Japan)
- [4.] J.A. Gallego-Juerez, E.R.F. De Sarabia, G. Rodriguez-Corral, T.L. Hoffman, J.C. Galvez-Moraleda, J.J. Rodriguez-Maroto, F.J. Gomez-Moreno, A. Bahillo-Ruiz, M. Martin-Espigares, M. Acha, Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emission from coal combustion plants, Environ. Sci. Technol. 33 (21) (1999) 3843-3849.
- [5.] A. Bologa, H.R. Paur, T. Waig scher, Electrostatic charging of aerosols as a mechanism of gas cleaning from submicron particles, Filtr. Separ. 38 (10) (2001) 26-30.
- [6.] C.J. Stairmand, Some industrial problems of aerosol pollution, Proc. R. Soc. London A 307 (1489) (1968) 209-214.
- [7.] T. Watanabe, F. Tachikubo, Y. Koizumi, T. Tsuchida, J. Hautanen, agglomerator, J. Electrostat. 34 (1995) 367-383.
- [8.] G.G. Won, G.S.P. Castle, An investigation of an AC precipitator agglomerator, IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting, 28 September- 3 October, Cincinnati, OH, Part II, 1980, pp. 941-947.
- [9.] J. Hautanen, M. Kilpeläinen, E.I. Kauppinen, J. Jokiniemi, K. Lehtinen, Electrical agglomeration of aerosol particles in an alternating electric field, Aerosol Sci. Technol. 22 (2) (1995) 181-189.
- [10.] J. Kildeso, V.K. Bhatia, L. Lind, E. Johnson, A. Johansen, An experimental investigation for agglomeration of aerosols in alternating electric fields, Aerosol Sci. Technol. 23 (1995) 603-610.
- [11.] J.S. Shrimpton, R.I. Crane, Small electrocyclone performance, Chem. Eng. Technol. 24 (9) (2001) 951-955.
- [12.] A. Laitinen, J. Hautanen, J. Keskinen, E. Kauppinen, J. Jokiniemi, K. Lehtinen, Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar gas flow, J. Electrostat. 38 (1996) 303-315.
- [13.] Y.S. Kim, J.B. Lee, J. Hwang, K.S. Park, An experimental study of electrical agglomeration of fine particles in an alternating electric field, Seventh International Conference on Electrostatic Precipitation, Kyongju, Korea, 20-25 September, 1998, pp. 179-187.
- [14.] A. Zukeran, Y. Ikeda, Y. Ehara, T. Ito, T. Takahashi, H. Kawakami, T. Takamatsu, Agglomeration of particles by ac corona discharge, Electr. Eng. Japan 130 (1) (2000) 30-37.
- [15.] Y. Nakajima, T. Sato, Electrostatic collection of submicron particles with the aid of electrostatic agglomeration promoted by particle vibration, Powder Technol. 135-136 (2003) 266-284.
- [16.] T.M.P. Briels, E.M. van Veldhuizen and U. Ebert, "Branching of Positive Discharge Streamer in Air at Varying Pressures", IEEE Transaction on Plasma Science 33, pp. 264-265, (2005)
- [17.] E.H.R. Gaxiola, "Dielectric breakdown in insulating gases, space charge effects and non-uniform fields", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, (1999)
- [18.] J.T. Kennedy, "Study of the avalanche to streamer transition in insulating gases", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, (1995)
- [19.] J.M. Meek and J.D. Craggs(editors), "Electrical Breakdown of gases", John Wiley & Sons, ISBN 0-471-99553-3, (1978)
- [20.] H. Raether, "Electron Avalanches and Breakdown in Gases", Butterworths, London, ISBN, (1964)
- [21.] C. Montijn, "Evolution of Negative Streamers in Nitrogen: a Numerical Investigation on Adaptive Grids", Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, (2005)

- [22.] C. Montijn and U. Ebert, "Diffusion correction of the Raether-Meek criterion for the avalanche-to-streamer transition", *Journal of Physics D: Applied Physics* 39, pp.2979-2992,(2006)
- [23.] S.K. Dhali and P.F. Williams, "Two-dimensional studies of streamers in gasses", *Journal of Applied Physics* 62, pp. 4696-4707, (1987)
- [24.] U. Ebert, C. Montijn, T.M.P. Briels, W. Hundsdorfer, B. Meulenbroek, A. Rocco and E.M. van Veldhuizen, "The multiscale of streamers", *Plasma Sources Science and Technology* 15, pp. S118-S129, (2006)
- [25.] C. Montijn, W. Hundsdorfer and E. Ebert, "An adaptive grid refinement strategy for the simulation of negative streamers", *Journal of computational physics* 219, pp. 801-835, (2006)
- [26.] S.Badaloni and I. Gallimberti, "The inception mechanism of the first corona in non uniform gaps", *Universita' Di Padova, Italy, internal report, (1972)*
- [27.] I. Gallimberti, "Mathematical models for the streamer formation in non-uniform gaps", *Universita' Di Padova, Italy, internal report, (1972)*
- [28.] R. Morrow and J.J. Lowke, "Streamer propagation in air", *Journal of Physics D: Applied Physics* 30, pp. 614-627, (1997)
- [29.] Y.P. Raizer, "Gas Discharge Physics", Springer, ISBN 3-540-19462-2, (1991)



การถ่ายเทพลังงาน

# ความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ด้านความร้อน

การจัดประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล  
ในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 7)



วันที่ 13-14 มีนาคม 2551  
ณ. โรงแรมยูเรเชีย เชียงใหม่

จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 7)  
วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเชีย จังหวัดเชียงใหม่

**การกำจัดอนุภาคเขม่าควัน  
ด้วยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพัลส์  
SOOT REMOVAL BY PULSE- ENERGIZED ELECTROSTATIC PRECIPITATOR**

**นคร ทองเล็ก**  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
128 ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัด  
เชียงใหม่ 50300  
โทร. 053-892780 ต่อ 2123  
E-mail:nakhom\_th@hotmail.com

**ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์**  
ภาควิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ  
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200  
โทร. 053-944144 ต่อ 961  
โทรสาร 053-944145  
E-mail: tanongkiat\_@yahoo.com

**บทคัดย่อ**  
อนุภาคเขม่าควัน เป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ และปัญหามลภาวะทางอากาศและปัญหาสุขภาพของมนุษย์ บทความนี้จึงได้นำเสนอการศึกษาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควัน โดยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพัลส์ พลาสมาอุณหภูมิไม่ต่ำ (Non-thermal plasma) ที่เกิดจากการกระตุ้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์ ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มขึ้น โดยทำการทดสอบเครื่องต้นแบบในการกำจัดควัน ผลการทดสอบพบว่าการกระตุ้นด้วยพัลส์มีประสิทธิภาพการดักจับสูงถึงประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ ใช้พลังงานน้อยกว่า และยังมีความสามารถลด NO, NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> เทียบกับการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับเพียง 80 เปอร์เซ็นต์  
**คำหลัก,** อนุภาคเขม่าควัน, เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต, พัลส์โคโรนาพลาสมา

**Abstract:**

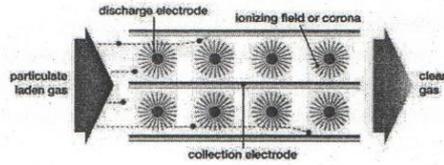
Soot particles are causes of the air pollution and the health problems. This paper presents the efficiency of pulse-energized electrostatic precipitator for collection of soot particles. Non-thermal plasma generated by applies a pulse voltage to the electrostatic precipitator could enhance the collection efficiency. According to this effect, a pulse-energized electrostatic precipitator is design to remove soot particles. The results shows that the remove efficiency of soot particles could be up to 95% including the removal of NO, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> compared to D.C. energization of which the efficiency is about 80%

**Keywords:** soot panicles, electrostatic precipitator, pulse corona plasma

**1. บทนำ**

ในปัจจุบันเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก ทั้งฝุ่นละอองที่ผสมมากับควันไฟ, เขม่าควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เขม่าควันบุหรี่ ควันธูปหรือกลิ่นเหม็นอับ อนุภาคฝุ่นจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เขม่าควันจากท่อไอเสียเครื่องยนต์ การตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตอาศัยแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) กระทำต่อตัวอนุภาคเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีผลกระทบต่อกระแสการไหลของก๊าซ ดังนั้นข้อดีของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้คือทำให้ความดันสูญเสียของก๊าซมีค่าต่ำปกติก็น้อยกว่า 1000 Pa และมีประสิทธิภาพการตกตะกอนสำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 50  $\mu\text{m}$  สูงปกติจะมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และข้อดีที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนี้ก็คือค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ [5] กระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เป็นวิธีการกำจัดอนุภาคออกจากการไหลของแก๊ส โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าดังรูปที่ 1 โดย

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ดิสชาร์จอิเล็กโทรด (Discharge electrode) และขั้วตกตะกอน (Collection electrode) เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับดิสชาร์จอิเล็กโทรด โดยที่แผ่นตกตะกอนเป็นกราวด์จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ขึ้นโดยรอบๆ อิเล็กโทรด ไอออน (Ions) และอิเล็กตรอน (Electrons) จะถูกสร้างขึ้นที่จุดที่เกิดโคโรนาและทำให้เกิดการไหลของกระแสไอออน (Ionic current) ผ่านช่องว่างระหว่างดิสชาร์จอิเล็กโทรดกับแผ่นตกตะกอน เมื่อมีอากาศที่มีอนุภาคฝุ่นแขวนลอยอยู่ไหลผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้จะทำให้เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคกับไอออน ไอออนเกาะติดกับอนุภาคเหล่านั้นเป็นผลทำให้อนุภาคได้รับประจุ และอนุภาคที่มีประจุ (Charged particle) ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปยังแผ่นตกตะกอนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่าแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) และถูกสะสมตัวอยู่บนแผ่นตกตะกอนโดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากแผ่นตกตะกอนโดยการเกาะแผ่นตกตะกอนด้วยค้อนเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลง



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มสมรรถนะให้กับเครื่องมือทำความสะอาดก๊าซแบบอื่นโดยการใช้แรงไฟฟ้า และยังมีกรวิจัยและพัฒนาการเพิ่มสมรรถนะให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพื่อให้มีประสิทธิภาพการกักเก็บสูงขึ้น ใช้พลังงานน้อยลง ลดต้นทุนการผลิต และมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนต่อไปและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เทคนิคพัลส์โคโรนาพลาสมาเป็นการสร้างพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำโดยกระตุ้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดา ด้วยพัลส์แรงสูงที่มีความกว้างพัลส์ต่ำกว่า 1  $\mu$ S เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจและยังมีการพัฒนาเพื่อนำมาใช้งานในการบำบัดก๊าซพิษและอนุภาคขนาดเล็กในเวลาเดียวกัน ขณะนี้อยู่ในขั้นตอนการศึกษาและค้นคว้าและพัฒนาสู่อุตสาหกรรม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการดักจับกำจัดเขม่าควันดำโดยใช้เทคนิคโคโรนาพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำ ที่สร้างจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงจากชุดอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกแกนร่วมที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ ที่ใช้แหล่งจ่ายจากเบตเตอร์ 12 โวลต์แล้วแปลงเป็นไฟฟ้าแรงสูงรูปคลื่นพัลส์ด้วยหม้อแปลงพัลส์ (Pulse Transformer) เพื่อสามารถพัฒนานำไปติดตั้งใช้งานทำความสะอาดก๊าซในระบบที่ไม่ซับซ้อนมาก ต้นทุนต่ำ เช่น เต้าผายขยะขนาดเล็กหรือเต้าผายขยะมวลขนาดเล็ก เป็นต้น

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครนาดีสชาร์จในก๊าซ

โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) เป็นส่วนที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เพราะเป็นกระบวนการสร้างไอออนที่ทำให้อนุภาคได้รับประจุ (Charged particle) โครนาดีสชาร์จจะสัมพันธ์กับกระแสและแรงดัน (Voltage-current characteristics) เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset voltage) กระแสโคโรนา (Corona current) จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดจะสร้างประกายโคโรนา (Spark over corona) ดังนั้น เราจำเป็นต้องรู้สนามไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องตกตะกอนเพื่อ กำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (Corona onset field strength)  $E_c$  ได้ตามสมการของพีด ดังนี้

$$E_c = E_0 \left[ \delta + A \sqrt{\frac{\delta}{r_1}} \right] \tag{1}$$

$$\delta = \frac{T_r}{T} \frac{P}{P_r} \tag{2}$$

เมื่อ  $E_0$  คือสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown field) ในอากาศที่สภาวะปกติ ( $3.126 \times 10^6$  V/m สำหรับความดันบรรยากาศ ที่  $20^\circ\text{C}$ )  $A$  คือค่าคงที่ ( $0.0301 \text{ m}^{1/2}$  สำหรับโคโรนาขั้วลบ และ  $0.0266 \text{ m}^{1/2}$  สำหรับโคโรนาขั้วบวก) คือความหนาแน่นของอากาศที่ความดันบรรยากาศ  $T_r$  คืออุณหภูมิห้องของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน ( $293 \text{ K}$ )  $T$  คืออุณหภูมิของอากาศขณะทำงาน  $P_r$  คือความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน (1 บาร์) และ  $P$  คือความดันบรรยากาศขณะทำงาน

2.2 การอัดประจุอนุภาค

อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากโคโรนาที่อยู่ภายในบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงมาก จะเคลื่อนตัวพุ่งออกจาก ดีสชาร์จอิเล็กโทรดด้วยความเร็ว เนื่องจากแรงทางไฟฟ้า แล้วชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดก๊าซไอออนลบ อิเล็กตรอนแตกตัวเป็นไอออนบวก ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระอย่างรวดเร็ว ทั่วคุณะเวลาสั้น (Avalanche multiplication) และไอออนลบเคลื่อนที่มีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนหลายร้อยเท่า จะเคลื่อนที่เข้าชนกับดีสชาร์จอิเล็กโทรดซึ่งส่วนมากเป็นโลหะตัวนำ ทำให้เกิดการหลุดของอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะทำให้เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนดั้งเดิมเพิ่มขึ้นอีก เราเรียกว่าการปลดปล่อยในขั้นที่สอง (Secondary emission) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นอย่างมากมาย

เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง เคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ ที่เรียกว่า อินเตอร์อิเล็กโทรด อิเล็กตรอนจะเข้าชนกับโมเลกุลของก๊าซในบริเวณนี้ เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีความเข้มน้อยจึงทำให้พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าต่ำกว่าเมื่อชนกับโมเลกุลของก๊าซจึงเป็นการเกาะติดเกิดก๊าซไอออนลบ เนื่องจากมันมีประจุเป็นลบทำให้มันเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับอิเล็กตรอน คือเข้าสู่อิเล็กโทรดกักเก็บ แล้วไอออนลบเหล่านี้ จะเคลื่อนที่ตามเส้นสนามไฟฟ้าเข้าไปเกาะติดกับอนุภาคที่ปนเข้ามาในอากาศ ด้วยแรงดึงดูดของประจุจินตภาพ (Image charge force) เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับก๊าซไอออน ทำให้อนุภาคหนึ่งสามารถรับประจุจากก๊าซไอออนได้หลายตัว โดยอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร สามารถรับประจุก๊าซไอออนประมาณ 10 ตัว ในขณะที่ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตรสามารถรับประจุก๊าซไอออน 100,000 ตัว เมื่ออนุภาคได้รับการประจุจากการเกาะติดของก๊าซไอออนจำนวนหนึ่งจนอิ่มตัวแล้วอนุภาคจะไม่มีประจุเพิ่มขึ้นอีก อนุภาคที่มีประจุเหล่านี้จะเคลื่อนตัวเข้าไปเกาะติดที่แผ่นกักเก็บการประจุด้วยสนามไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อก๊าซไอออนเคลื่อนที่ตามเส้นสนามสนามไฟฟ้าจนกระทั่งเข้าเกาะติดอนุภาคจนไม่สามารถรับประจุได้อีก

กลไกการประจุอนุภาคมี สองแบบคือ การประจุด้วยการแพร่ (Diffusion charging) และ การประจุด้วยสนามไฟฟ้า (field charging) กลไกการประจุด้วยการแพร่ เป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ของก๊าซไอออน ความเร็วการเคลื่อนที่แบบสุ่มนี้ จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ อันเนื่องมาจากความร้อน ของไอออนที่ค่ามากเกินแรงหลักของไอออนภายในอนุภาค การที่ไอออนของก๊าซเคลื่อนที่แบบสุ่มด้วยทฤษฎีจลน์ของก๊าซ ทำให้เกิดการชนกับ

อนุภาคทำให้เกิดการเกาะติดของอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคทำให้อนุภาคได้รับประจุ กลไกทั้งสองจะเกิดขึ้นกับอนุภาคทุกขนาด แต่ในอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า 2 ไมโครเมตร ประจุส่วนมากที่เกิดขึ้นบนอนุภาคจะเกิดเนื่องจากการประจุด้วยสนามไฟฟ้า ขณะที่ประจุส่วนมากบนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร จะเกิดจากกลไก การประจุด้วยการ แพร่

#### 2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการตกตะกอน

เมื่ออนุภาคที่มีประจุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้ม  $E$  อนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงกระทำทางไฟฟ้า  $F_E$  ที่กระทำต่ออนุภาคเมื่ออนุภาคมีประจุไฟฟ้า สามารถหาได้จาก

$$F_E = qE = n_p e E$$

เมื่อ  $q$  คือประจุไฟฟ้าของอนุภาค ส่วนแรงหนืด (Viscous force) ที่กระทำกับอนุภาคขณะเคลื่อนที่คือ [3]

$$F_D = \frac{3\pi\mu d_p V_{TE}}{C_c} \quad (3)$$

#### 2.5 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาค

ประสิทธิภาพการตกตะกอนอนุภาค (Collection efficiency) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต สามารถคำนวณได้จากสมการของ Deutsch คือ

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{V_{TE}A}{Q}\right) \quad (4)$$

เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ของอิเล็กโทรดกักเก็บ

#### 2.6 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Power Consumption)

กำลังโคโรนา(Corona Power) คือกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเกิดจากกระแสโคโรนาและแรงดันเฉลี่ยดังนี้

$$P_c = I_c V_{avg} \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วในการเคลื่อนที่ตัวทางไฟฟ้ากับ กำลังโคโรนา คือ

$$V_{TE} = k \frac{P_c}{A} \quad (6)$$

เมื่อ  $\frac{P_c}{A}$  คือ ความหนาแน่นกำลังงาน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโคโรนา กับ ประสิทธิภาพคือ

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{kP_c}{Q}\right) \quad (8)$$

#### 2.7 ฟลัสโคโรนาพลัสมา

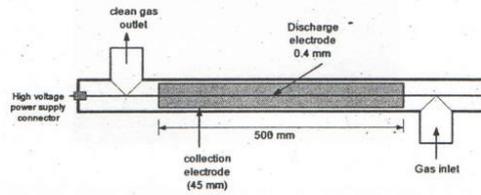
การศึกษาพัฒนาฟลัสโคโรนา ได้เริ่มต้นขึ้นจากการพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการ (4) แต่การเพิ่มแรงดันมีขีดจำกัดสูงสุด ได้ไม่เกินค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรคดาวน์ จึงมีการใช้แรงดันลบในการสร้างโคโรนาเนื่องจากมีค่าแรงดันเบรคดาวน์สูงกว่าเมื่อใช้แรงดันบวกในการทำให้เกิดโคโรนา[2] จากความเข้มงวดของการควบคุมการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ ทำให้ต้องการเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่มีสมรรถนะสูงขึ้น การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงสูงขั้วลบไม่สามารถจะทำได้ ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเช่น แบล็คโคโรนา(Black-corona) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นฝุ่นความต้านทานสูงนำไปสู่การหลุดกระจายของอนุภาคฝุ่นที่เกาะติดอิเล็กโทรดกักเก็บเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพเครื่องกักเก็บลดลง การกระตุ้นด้วยฟลัสจึงได้นำเสนอขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ เนื่องจากสามารถทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นโดยไม่เกิดการเบรคดาวน์ คุณลักษณะของฟลัสที่ใช้กระตุ้นต้องมีความกว้างฟลัสน้อยกว่า 1 ไมโครวินาที ปัจจุบันได้นำเอาเทคนิคการกระตุ้นด้วยฟลัส มาทำการปรับปรุงสมรรถนะ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต โดยใช้แรงดันสูงฟลัสบวกเนื่องจากมีความสามารถในการเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้ออกจากจะมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค และยังสามารวกำจัดมลภาวะที่เป็นก๊าซได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี ฟลัสโคโรนาทำให้เกิดพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ โดยการใช้อิเล็กโทรดปล่อยประจุที่มีรูปร่างแหลมคม การปล่อยประจุจะเริ่มต้นที่บริเวณความเครียดสนามไฟฟ้าสูงใกล้ๆ กับอิเล็กโทรดรูปร่างแหลมคม การออกแบบ ห้องปฏิกรณ์พลาสมาสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น แบบ สาย-กระบอก(Wire-cylindrical) เน้นการใช้งานกับมลภาวะที่เป็นก๊าซเช่นการกำจัดคาร์บอน เพราะมีการไหลของอากาศเป็นอนุกรม เมื่ออิเล็กตรอนถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากทำให้มันชนกับโมเลกุล ตามเส้นทางเคลื่อนที่ของมัน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและเปลี่ยนทิศทาง ที่ความดันบรรยากาศก๊าซจะมีความหนาแน่นสูงมาก ดังนั้น จึงมีโอกาสนในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซ มีค่าสูง เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นโมเลกุลที่ได้รับการถ่ายเทพลังงานจะแสดงพฤติกรรม คือเคลื่อนที่ หรือหมุน(0.12eV) สั่น (0.5eV) ตื่นกระตุ้น(5eV) และ ไอออนไนเซชัน(10eV) การแตกตัวเป็นไอออนทำให้เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากมาย ถึงแม้สนามไฟฟ้าจะมีความเข้มสูงมาก แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ การเกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ทำให้เกิดไอออนจำนวนมาก เนื่องจากมันมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนหลายเท่าทำให้มันเคลื่อนที่ได้ช้าจนถือได้ว่าหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดประจุค้างขึ้นประจุค้างเหล่านี้จะสร้างสนามไฟฟ้าของมันขึ้นเองทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นจากภายนอก ทำให้การเกิดอะวาลานซ์หยุดลง แต่ถ้าสนามไฟฟ้าบริเวณส่วนหัวของประจุค้างมีค่าสูงมากพอจะทำให้เกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนไปได้อีก ดังนั้น อะวาลานซ์จะถูกสร้างขึ้นไปจนถึงอิเล็กโทรดอีกกักเก็บ ถ้าสนามไฟฟ้าบริเวณประจุค้างยังมีมากพอจะเกิดกระบวนการซ้ำด้วยตัวมันเองและเกิดเป็นบริเวณประจุค้างเชื่อมต่อกันระหว่างอิเล็กโทรด การเกิดประจุค้างเรารีเร็วกว่าสตรีมเมอร์ การ

เคลื่อนที่ของการเกิดประจุค้างเราเรียกว่าหัวสริมเมอร์ ความเร็วของหัวสริมเมอร์ประมาณ  $2 \times 10^6$  ถึง  $3 \times 10^6$  m/s [3] ดังนั้นถ้าจ่ายแรงดันพัลส์ที่มีช่วงเวลามากกว่าการเกิดสริมเมอร์พลังงานส่วนหนึ่งจะใช้สำหรับสร้างอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ไม่ได้ใช้ในกระบวนการเคมีทำให้ประสิทธิภาพลดลง

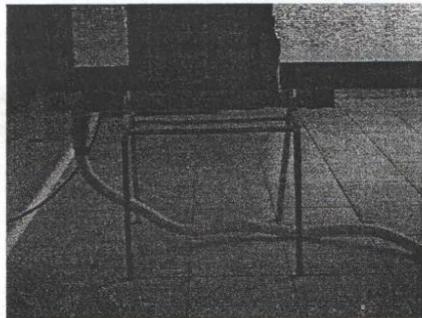
3. เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

3.1 เครื่องตกตะกอนเชิงสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกแกนร่วม

ต้นแบบเครื่องตกตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 2 ท่อตกตะกอนทรงกระบอกทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 450 mm หนา 5 mm มีความยาวประสิทธิภาพ 500 mm และลวดคัสซาร์จทำจากลวดนิโครมเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดคัสซาร์จ เท่ากับ 0.3 mm อยู่ตรงแกนกระบอก ที่หุ้มฉนวนด้วยท่อพีวีซี



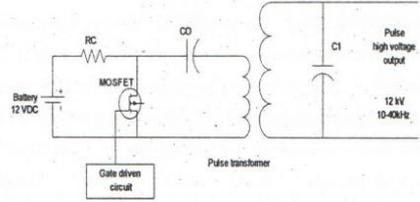
รูปที่ 2 ส่วนประกอบต้นแบบของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



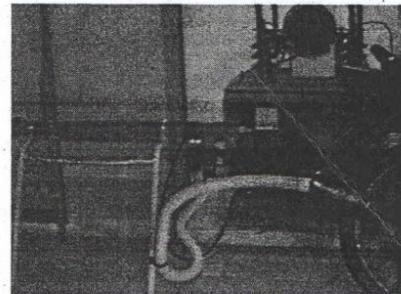
รูปที่ 3 ต้นแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่ใช้ทดสอบ

3.2 แหล่งจ่ายพัลส์แรงดันสูง

แหล่งจ่ายแรงดันสูงแบบพัลส์ที่ใช้สำหรับกระตุ้นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต มีวงจรไฟฟ้างดรูปที่ 4 วงจรสามารถสร้างพัลส์มีช่วงเวลาขึ้นสูงสุดที่ 400 ns และมีความกว้างพัลส์ 500ns โดยการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์และทำการเพิ่มให้สูงขึ้นโดยหม้อแปลงพัลส์ทำให้แรงดันสูงขึ้นกว่า 12 kV ความถี่ของพัลส์สามารถปรับได้จนถึง 40 kHz



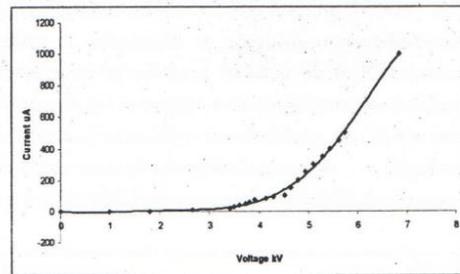
รูปที่ 4 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันรูปคลื่นพัลส์



รูปที่ 5 การทดสอบดักจับเขม่าควัน

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบคุณลักษณะแรงดันกระแสของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ขณะไม่มีภาระโดยการจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงปรับค่าได้ โดยการเพิ่มแรงดันกระแสไฟฟ้าไหล พบว่ามีแรงดันเริ่มเกิดที่ประมาณ 2.8 kVDC เมื่อทำการเพิ่มแรงดันสูงขึ้นไปอีกพบว่ากระแสโคโรนาจะเพิ่มตาม จนแรงดันสูงสุดที่ 7 kVDC กระแสไฟฟ้าไหลประมาณ 1 mA ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสโคโรนา

การทดสอบสมรรถนะการดักจับเขม่าของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพัลส์ เทียบกับกระแสกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง โดยทำการทดสอบดังนี้

การทดสอบประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตที่กระตุ้นด้วยพัลส์แรงสูงขนาด 7 kV โดยใช้

ความกว้างพัลส์ 20  $\mu$ s โดยความถี่พัลส์ 20 kHz เปรียบเทียบการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง 7 kV มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** โดยการปล่อยไอเสียจากรวมมอเตอร์ไซค์ ผ่านเข้าไปในเครื่องตกตะกอนโดยตรงรูปร่างที่ 5 ที่มีแผ่นกรองทางออกของท่อไอเสียที่มีความเร็วลมด้วย ANEMOMETER ของ DIGICON โมเดล DA-45 ได้ 3.4 m/s เดินเครื่องเบา 10 นาที และนำกระดาษกรองออก เก็บกระดาษกรองไว้ในกล่องที่ปิดสนิทที่มีวัสดุดูดความชื้น (silica gel) เพื่อดูดความชื้นออกจากกระดาษกรอง

**ขั้นตอนที่ 2** ทำการกระตุ้นแรงดันสูงให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต หลังจากนั้นปล่อยไอเสียจากรวมมอเตอร์ไซค์ ผ่านเข้าไปในเครื่องตกตะกอนโดยตรงที่มีแผ่นกรองทางออกของท่อไอเสียที่มีความเร็วลม 3.4 m/s เดินเครื่องเบา 10 นาที และนำกระดาษกรองออก เก็บกระดาษกรองไว้ในกล่องที่ปิดสนิทที่มีวัสดุดูดความชื้น (silica gel) เพื่อดูดความชื้นออกจากกระดาษกรอง

**ขั้นตอนที่ 3** ทำการทดสอบในขั้นตอน 1 และ 2 ซ้ำ 5 รอบ

**ขั้นตอนที่ 4** นำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งดิจิทัล METTLER TODO

นำผลที่ได้ไปหาประสิทธิภาพการกักเก็บของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตจากสมการ

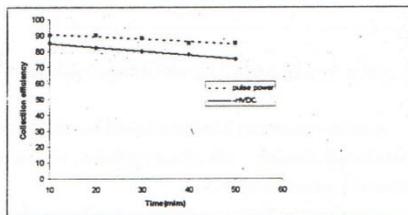
$$\eta = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_1} \right)$$

เมื่อ  $m_1$  คือ น้ำหนักของอนุภาคเขม่าควันจากท่อไอเสียรวมมอเตอร์ไซค์ขณะไม่จ่ายแรงดันให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

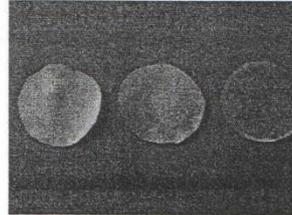
$m_2$  คือ น้ำหนักของอนุภาคเขม่าควันจากท่อไอเสียรวมมอเตอร์ไซค์เมื่อจ่ายแรงดันให้กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

จากทดสอบประสิทธิภาพการดักจับเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงรูปคลื่นพัลส์ และไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน

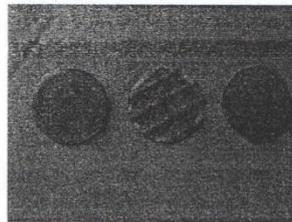
พบว่า การกระตุ้นด้วยแรงดันรูปคลื่นพัลส์ทำให้เกิดพัลส์โคโรนา จะเห็นว่าประสิทธิภาพการดักจับสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ใน 10 นาทีแรก และจะลดลง เป็น 88,85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในช่วงเวลา 50 นาที ขณะที่ผลของการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงนั้นมีประสิทธิภาพการดักจับ 85 เปอร์เซ็นต์และมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 เพราะกระแสโคโรนาลดลงเนื่องจากเกาะติดของอนุภาคเขม่าควันที่อิเล็กโทรด แต่ขนาดของแรงดันไฟฟ้ายังมีค่าสูงอยู่



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

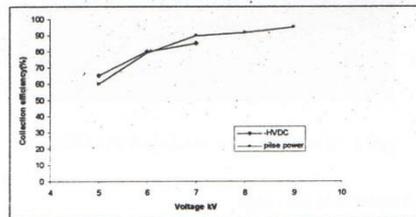


รูปที่ 8 เขม่าบนกระดาษกรองกรองหลังถูกดักจับเครื่องกรองเชิงไฟฟ้าสถิต ในช่วงเวลา 30 นาทีหลัง



รูปที่ 9 เขม่าบนกระดาษกรองกรองไม่ผ่านเครื่องกรองเชิงไฟฟ้าสถิต

เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น จะเกิดการเบรกควานในการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับลดลงอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถต่อไปได้อีก แต่การเพิ่มแรงดันในการกระตุ้นด้วยพัลส์ถึง 9 kV ความถี่พบว่าเกิดการปล่อยประจุสตริมเมอร์โคโรนา โดยไม่เบรกควาน ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้นไปได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มระดับแรงดันกระตุ้น

และประสิทธิภาพด้านพลังงาน ของการกระตุ้นแบบพัลส์จะสูงกว่าโดยเครื่องต้นแบบการกำจัดเขม่าควันเชิงไฟฟ้าสถิตเมื่อทำการกระตุ้นด้วยพัลส์ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 1 วัตต์ (ไม่รวมกับที่ใช้วงจรควบคุม) ขณะที่กระตุ้นด้วย ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ใช้กำลังไฟฟ้า 7 วัตต์ และเมื่อเริ่มเกิดสตริมเมอร์โคโรนา พบว่าการเปลี่ยนแปลง ของก๊าซที่วัด โดยทำการวัดก๊าซจากท่อไอเสียขณะไม่ผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้า

สถิต ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Fuel gas analyzer: testo 350-XL) เปรียบเทียบเข้มข้นกับก๊าซที่ผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตได้ผล ดังพบว่า ความเข้มข้นของ NO, NO<sub>x</sub> ละ SO<sub>2</sub> ลดลงจากเดิมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดส่วนประกอบก๊าซจากท่อไอเสีย

ก๊าซต่างๆ ที่ออก จากท่อไอเสียของรถ มอเตอร์ไซค์	ความเข้มข้นก๊าซที่ไม่ ผ่านกรองด้วยเครื่องตก ตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	ความเข้มข้นก๊าซที่ผ่าน ดักจับเขม่าด้วยเครื่องตก ตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต กระตุ้นด้วยพัลส์
CO <sub>2</sub>	6.38 %	6.33 %
NO	165 ppm	152 ppm
NO <sub>2</sub>	1.7 ppm	3.8 ppm
O <sub>2</sub>	12.35 %	12.43 %
CO	-	-
Fuel Temp.	30.6 °C	30.8 °C
NO <sub>x</sub>	166 ppm	155 ppm
SO <sub>2</sub>	94 ppm	34 ppm
H <sub>2</sub>	-	-

#### 5. บทสรุป

จากการทดสอบการดักจับเขม่าควันจากท่อไอเสียด้วยต้นแบบ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตกระตุ้นด้วยพัลส์ พบว่าสามารถดักจับ เขม่าจากท่อไอเสียได้สูงเกิน 95 เปอร์เซ็นต์และมีประสิทธิภาพด้าน พลังงานดีกว่าแบบธรรมดา โดยใช้กำลังไฟฟ้าเพียง 1 วัตต์ และถ้าทำ การเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีกจะทำให้โอเล็คตรอนได้รับพลังงานสูงขึ้นจะ เกิดโคโรนาพลาสมา ทำให้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เริ่มมีพฤติ กรรมเป็นเครื่องปฏิกรณ์ และจะเกิดปฏิกิริยาเคมีพลาสมา ทำให้โอ ะระเหย หรือก๊าซพิษเกิดการแตกตัว ทำให้เพิ่มสมรรถนะในการทำ ความสะอาดก๊าซของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตซึ่งกำลังอยู่ในขั้น ตอนการทดลองและจะนำเสนอในโอกาสต่อไป

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1]. Alonso J.M., Garcia J., and et. Al, "Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push-pull inverter", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 41, No. 5, Sept.-Oct. 2005, pp. 1364-1372
- [2]. ohm J., "Electrostatic precipitator", ISBN 0-444-99764-4, Elsevier Scientific publishing, The Netherlands, 1982  
Giorgio D., Valerio B., Massimo R., "Enhanced Precipitation Efficiency of Electrostatic Precipitators by Means of Impulse Energization", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 27, No.2, March/April 1999, pp. 323-330
- [3]. Kuffel E. and Zaengl W.S., "High Voltage Engineering Fundamental", Pergamon Press Ltd., 1<sup>st</sup> ed., 1984
- [4]. Mizuno, A., "Electrostatic Precipitation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.5, 615-624 (2000).



37. DURABILITY OF A SMALL AGRICULTURAL ENGINE ON BIOGAS/DIESEL DUAL FUEL OPERATION	139
38. EFFECT OF BOUND NUMBER ON HEAT TRANSFER OF THERMOSYPHON HEAT PIPE UNDER SOUND WAVE	140
39. EFFECT OF NEEDLE CONE ANGLE AND AIR FLOW RATE ON ELECTROSTATIC DISCHARGE CHARACTERISTICS OF A CORONA-NEEDLE IONIZER	141
40. EFFECTS OF ASPECT RATIOS AND NUMBER OF MEANDERING TURNS ON PERFORMANCE LIMIT OF AN INCLINED CLOSED-LOOP OSCILLATING HEAT PIPE	142
41. EFFECTS OF LIP THICKNESS ON ALVEOLAR BONE GRAFT OUTCOMES IN PATIENTS WITH COMPLETE UNILATERAL CLEFT LIP AND PALATE : FINITE ELEMENT ANALYSIS	143
42. EFFECTS OF REACTION FORCES AT CLAMPED EDGE ON DEFLECTION AND STRESS OF THIN PLATE	144
43. EFFECTS OF SEEDING ON PERFORMANCE OF HOUSEHOLD ORGANIC WASTE COMPOSTING USING PASSIVE AERATION	145
44. EFFECTS OF TEMPERATURE, VELOCITY AND RELATIVE HUMIDITY OF HOT AIR ON SLICED BANANA DRYING	146
45. ELECTRIC CYLINDER ENGINE	147
46. ENHANCMENT OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR SUBMICRON PARTICLE COLLECTION USING NON-THERMAL PLASMA TECHNIQUE	148
47. EVALUATION OF ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM WIND TURBINE FARM AT MHAE ROYAL PROJECT SAMOENG DISTRICT, CHIANG MAI PROVINCE, THAILAND	149
48. EVALUATION OF ENERGY ABSORPTION CAPABILITY OF LIGHT TRUCK'S FRONT NUDGE BAR	150
49. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING SYSTEM DRIVEN BY A SMALL BIOGAS ENGINE	151
50. FINDING ALL DC SOLUTIONS OF DIODE AND BJT CIRCUITS BY INTERVAL METHOD AND MODIFIED LP-NARROWING TECHNIQUE	152
51. GASIFICATION OF GIANT SENSITIVE PLANTS IN A FIXED BED REACTOR	153
52. HEAT AND MASS TRANSFER IN COMBINED CONVECTIVE AND FAR-INFRARED DRYING OF FRUIT LEATHER	154
53. HEAT EXTRACTION FROM SALINITY-GRADIENT SOLAR PONDS USING HEAT PIPE HEAT EXCHANGERS	155
54. IDENTIFICATION OF HYPERELASTIC MATERIAL PARAMETERS USING VIRTUAL FIELDS METHOD IN CASE OF LARGE DEFORMATIONS	156
55. IMAGE RESTORATION BASED ON A PAIR OF NOISY AND MOTION BLURRED IMAGES	157
56. IN VIVO CHARACTERIZATION OF THE AORTIC WALL STRESS-STRAIN RELATIONSHIP	158
57. INCORPORATING SIFT WITH HARD C-MEANS ALGORITHM	160
58. INVESTIGATION OF LIGHT TAR CRACKING IN A GLIDING ARC PLASMA SYSTEM	161
59. KINETICS AND MODELING OF WHOLE LONGAN WITH COMBINED INFRARED AND HOT AIR	162
60. LEACHING OF HEAVY METAL FROM SPENT HOUSEHOLD BATTERIES	163
61. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF FROZEN OKRA PRODUCTION BY PARAMETER SCREENING METHOD	164

## ENHANCEMENT OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR SUBMICRON PARTICLE COLLECTION USING NON-THERMAL PLASMA TECHNIQUE

Nakhorn Thonglek<sup>1</sup> and Tanonkiat Kiatsiriroat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50202, Thailand.*

<sup>2</sup>*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai 50202, Thailand.*

### ABSTRACT

Removing submicron particles from air is very important because most of them, with a size smaller than 1  $\mu\text{m}$  have a detrimental effect on human health. High particle collection efficiency in terms of particle weight/volume is well achieved by a conventional electrostatic precipitator (ESP). However, the collection efficiencies in terms of number density for the submicron particles by conventional ESP are still relatively low. Therefore, it is necessary to improve the collection efficiency for submicron particles. By forming large particles, plasma agglomeration of submicron particles is presented as a promising process for enhancing the efficiency of the current electrostatic precipitation for small size particle removal. This research is to study the effect of flow rate of combustion gas, pulse peak voltage and pulse frequency on the plasma agglomeration of carbon particles in nanometer size range. For the agglomeration test, the experimental consists of a wire-plate electrostatic precipitator with a saw-tooth electrode. For the ESP under pulse corona energization, the experimental results show that the particle reduction efficiency curve has the highest reduction efficiency for particles with a diameter near 200 nm. The particle reduction efficiency increases with increasing pulse peak voltage and pulse frequency, but decreases if the gas velocity is high.

Key words: plasma technique

---

Published in the Proceedings of the 5<sup>th</sup> Academic Days "Research Path: The Fifth Decade Towards a University of Excellence" pp.401, Chiang Mai, Thailand, November 2009.



**การเพิ่มความสามารถเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต**

**Enhancement of Electrostatic Precipitator**

ผศ.นศร ทองเล็ก และ ศ.ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

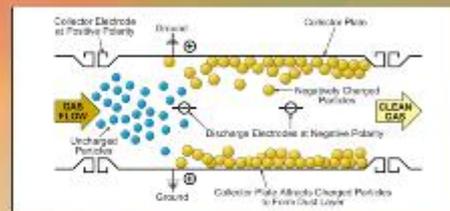
ห้องปฏิบัติการหน่วยวิจัยระบบทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



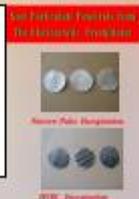
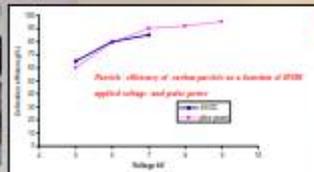
An electrostatic precipitator (ESP) is an apparatus capable of removing suspended particle out of gas stream. It is a device which uses electrostatic force to precipitate particles. The ESP contains a set of sharp discharge electrodes place between two parallel collection plates. The discharge electrodes are connected to the high voltage supply, while collection electrodes are grounded. The high electric field strength around the discharge electrodes causes the corona discharge. The ions and electrons produced by corona discharge charge the particle and travel them towards the collection electrodes where they deposit. The electrostatic precipitator has collection efficiency more than 99% in terms of weight/volume.

However, the collection efficiency in terms of number density for submicron particles by conventional ESP are below 50% . Thermal system research unit studies aimed at improve the collection efficiency and the enhancement of electrostatic precipitator for submicron particle collection. Nowadays, non-thermal plasma technique have been proposed.



**ESP EFFICIENCY ENHANCMENT BY NARROW PULSE ENERGIZATION**

The increasing efficiency of ESP by increasing the applied voltage. It has been limited by breakdown voltage. The narrow pulse voltage can make much higher electric fields applied during the duration of the pulse without causing spark breakdown in the ESP. The narrow pulse energization ESP generates much higher electron density than dc energization and, hence , enhances particle charging due to much larger mobility of electron, and improves the submicron particle collection efficiency.



**ESP EFFICIENCY ENHANCMENT BY NON-THERMAL PLASMA**

In recent year, atmosphere pressure non-thermal plasma have been promoted as a technology for many applications in area of pollution control. One of such plasmas is pulsed corona discharge plasma, which generated by applying voltage pulse to discharge electrodes of ESP. Non-thermal plasma technique has been applied the submicron particle agglomerations and the enhancement of electron particle charging.



 <b>คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร</b>  <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์ <input type="checkbox"/> การออกแบบผลิตภัณฑ์ <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร  ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542	<b>สำหรับเจ้าหน้าที่</b>	
	วันรับคำขอ	เลขที่คำขอ
	วันยื่นคำขอ	
	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
	ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา	
วันออกสิทธิบัตร/อนุ สิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่		
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาขนาดเล็กว่าไมโครเมตรให้ใหญ่ขึ้น APPARATUS AND METHOD FOR SUBMICRON PARTICLE AGGLOMERATION		
2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่ ในจำนวน - คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน		
3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)  มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50202	3.1 สัญชาติ	
	3.2 โทรศัพท์	053-942459-60
	3.3 โทรสาร	053-892189
	3.4 อีเมล	
4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ <input checked="" type="checkbox"/> ผู้รับโอน <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น		
5. ตัวแทน(ถ้ามี)/ที่อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)  นางสาวภาณุวรรณ อันทวรรณ หน่วยจัดการทรัพย์สินทางปัญญาและถ่ายทอดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200	5.1 ตัวแทนเลขที่	1320
	5.2 โทรศัพท์	053-210731-2
	5.3 โทรสาร	053-210733
	5.4 อีเมล	panuwan@gmail.com
6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์และที่อยู่ ( เลขที่ ถนน ประเทศ ) <b>6.1 ชื่อผู้ประดิษฐ์คนที่ 1 ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ 300 ม. 2 บ้านป่าติว ต.สันป่าตอง อ.เมือง จ.เชียงใหม่</b> <b>6.2 ชื่อผู้ประดิษฐ์คนที่ 2 นายนคร ทองด้ง 128/50 ม. 1 ต.ช้างเผือก อ.เมืองเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่</b>		
7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร เลขที่ - วันยื่น - เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ <input type="checkbox"/> คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หรืออย่าง <input type="checkbox"/> ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ <input type="checkbox"/> ขอลเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ		

**หมายเหตุ:** ในกรณีที่นำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรโดยขอสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศพร้อมกัน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้ โดยระบุหมายเลขคำขอและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

หน้า 1 ของจำนวน 1 หน้า

**ข้ออธิสัพท**

1. เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาโนเล็กกว่าไมโครเมตรให้มีขนาดใหญ่ ที่ซึ่งประกอบด้วยช่องทางไหลของอากาศ (1) และส่วนกำเนิดพลาสมา (2) ที่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าแรงดันสูงทำให้ก๊าซที่ไหลเข้ามาแตกตัวเป็นลำพลาสมาที่ไม่เกิดความร้อน ซึ่งประกอบด้วยไอออนจำนวนมาก ด้วยสนามไฟฟ้าและการแพร่ความหนาแน่นของพลาสมาทำให้อนุภาคนาโนเล็กที่ปนมากับกระแสก๊าซได้รับการอัดประจุไฟฟ้า ส่งผลให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นประจุบวกและอีกส่วนหนึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นประจุลบ แล้วอนุภาคที่มีประจุเหล่านั้นจะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่องพลาสมา เทคนิคการรวมตัวด้วยพลาสมานี้มีลักษณะพิเศษคือสามารถอัดประจุและรวมตัวพร้อมกันในส่วนเดียวกัน

2. เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาโนเล็กกว่าไมโครเมตร ตามข้ออธิสัพทข้อ 1 ที่ซึ่งมีการสร้างพลาสมาแบบไม่เกิดความร้อนด้วยการกระตุ้นแรงดันสูงแบบพัลส์แคบที่อิเล็กโทรดปล่อยประจุ (3) สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าความเครียดสูงทำให้เริ่มเกิดไอออนแล้วก่อตัวเป็นพลาสมาพุ่งสู่ ทรานส์อิเล็กโทรด (4)

3. เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาโนเล็กกว่าไมโครเมตร ตามข้ออธิสัพทข้อ 2 ที่ซึ่งอิเล็กโทรดปล่อยประจุ (3) เป็นตัวนำมีลักษณะเหมาะสมที่ก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กโทรดกราวด์ ที่เหมาะสมอาจเป็นเส้นลวดทวิเรขขนาดเล็กลง หรือ เส้นลวดที่มีการปรับผิวให้มีจุดปลายแหลมแบบพื้นเลื่อย

4. เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาโนเล็กกว่าไมโครเมตร ตามข้ออธิสัพทข้อ 2 ที่ซึ่งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์แคบ (5) ที่มีการกำเนิดสัญญาณที่มีความกว้างพัลส์น้อยกว่า 1 ไมโครวินาที ที่ความถี่สูงกว่า 1 กิโลเฮิร์ต ที่เหมาะสม 10 กิโลเฮิร์ต ถึง 45 กิโลเฮิร์ต สร้างจากชุดกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันต่ำ (6) แล้วทำการแปลงระดับแรงดันให้สูงขึ้นด้วยหม้อแปลงพัลส์ (7) ในระดับแรงดันไฟฟ้า มากกว่า 1 กิโลโวลต์ ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 กิโลโวลต์ ถึง 50 กิโลโวลต์

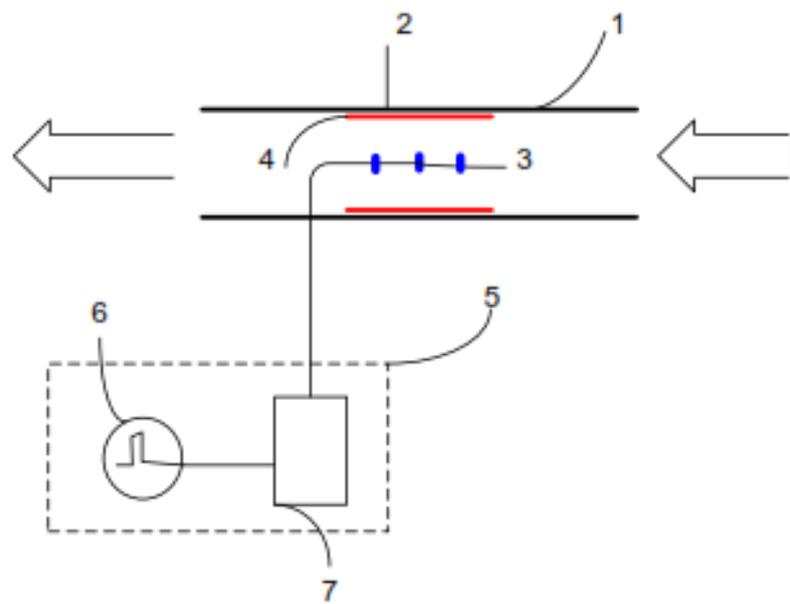
**บทสรุปการประดิษฐ์**

1. เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคนาโนไมโครเมตรให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยพลาสมาตามการประดิษฐ์นี้ เครื่องรวมตัวอนุภาคนาโนเล็กกว่าไมโครเมตรให้มีขนาดใหญ่ ที่ซึ่งประกอบด้วยช่องสำหรับกำเนิดพลาสมา (2) ทำหน้าที่กำเนิดไอออนสำหรับอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคนาโนเล็กที่ปนมากับกระแสก๊าซ ทำให้อนุภาคส่วนหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและอีกส่วนหนึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ แล้วเกิดการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเทคนิคพลาสมาซึ่งมีลักษณะพิเศษคือสามารถอัดประจุและรวมตัวอนุภาคในบริเวณเดียวกันอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เครื่องมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีขนาดกะทัดรัด ลดต้นทุนการผลิตและการสิ้นเปลืองพลังงาน

การกระตุ้นอิเล็กโทรดปล่อยประจุ (3) และอิเล็กโทรดกราวด์ (4) ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์แคบที่มีความกว้างพัลส์น้อยกว่า 1 ไมโครวินาที ที่ความถี่สูงกว่า 1 กิโลเฮิร์ต แรงดันสูงกว่า 1 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดพลาสมาที่ไม่เกิดความร้อนและความดันบรรยากาศจึงไม่ต้องเป็นระบบปิด อีกทั้งป้องกันการสปาร์กทำให้อัดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า

หน้า 1 ของจำนวน 1 หน้า

5



รูปที่ 1

10

หน้า 1 ของจำนวน 3 หน้า

**รายละเอียดการประดิษฐ์**

**ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์**

เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรให้ใหญ่ขึ้น

APPARATUS AND METHOD FOR SUBMICRON PARTICLE AGGLOMERATION

5 **สาขาวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์**

วิศวกรรมในส่วนของเครื่องกลและไฟฟ้า

**ภูมิหลังของศิลปะหรือวิชาการที่เกี่ยวข้อง**

อนุภาคขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศเป็นสาเหตุหนึ่งของมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็ก  
ระดับ 10 นาโนเมตรถึง 100 ไมโครเมตรส่งผลกระทบต่อสุขภาพและความเป็นอยู่ของมนุษย์อย่างมาก เนื่องจากมี  
10 มีขนาดเล็กสามารถลอยอยู่ในอากาศได้นานและสามารถดูดซับสารพิษต่างๆได้ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อ  
กระบวนการทางอุตสาหกรรม การปนเปื้อนในอาหาร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก  
เหล่านั้นออกจากอากาศอย่างมีประสิทธิภาพสูง ได้มีการพัฒนาตัวกรองอนุภาคเพื่อทำการกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก  
จากกระแสอากาศโดยใช้แรงไฟฟ้าสถิต แรงหนีศูนย์กลาง การดูดซับด้วยหยดน้ำและแผ่นกรองซึ่งมีประสิทธิภาพ  
การกรองอนุภาคสูงแต่ยังพบกับปัญหาในหลายด้าน ดังเช่น ความดันตก ประสิทธิภาพต่ำสำหรับอนุภาคที่มีขนาด  
15 เล็กกว่าไมโครเมตร และอายุการใช้งานสั้น มีโครงสร้างและหลักการงานที่ซับซ้อนใช้พลังงานสูง

เทคนิคการทำให้อนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น หรืออนุภาคเล็กไปเกาะติด  
กับอนุภาคขนาดใหญ่ จากระดับนาโนเมตรเป็นระดับหลายไมโครเมตรทำให้ง่ายต่อการกำจัดออกจากกระแส  
อากาศ สามารถทำได้โดยการใช้คลื่นเสียงและการควบคุมของไอน้ำ แต่วิธีการนี้สิ้นเปลืองพลังงานมาก ในการทำ  
ให้อนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรรวมกันเป็นก้อนด้วยผลทางคลื่นเสียง ในเครื่องคกตะกอนแข็งไฟฟ้าสถิตขนาด  
20 ใหญ่นั้นต้องใช้พลังงานถึงเมกะวัตต์ แต่ก้อนอนุภาคที่หมดอายุบางส่วนไปไม่เสถียร หรือยังรวมกันไม่หมด  
กว่าจะไปถึงขั้นตอนการตกตะกอน ส่วนเทคนิคการควบคุมไอน้ำนั้นสามารถรวมตัวอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพ  
แต่ก็ยังใช้พลังงานมากเช่นเดียวกัน จึงได้มีการนำเสนอใช้เทคนิคการทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตร  
รวมตัวกันด้วยไฟฟ้าสถิต เนื่องจากขณะทำงานมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงมาก มีหลักการงานคือ ใน  
ขั้นตอนแรก อนุภาคจะถูกอัดประจุไฟฟ้าโดยให้มีขั้วต่างกัน และในขั้นตอนที่สองจะเป็นการกระตุ้นด้วย  
25 สนามไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะทำให้อนุภาครวมตัวกัน เครื่องรวมอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยสนามไฟฟ้า  
ทั่วไปมีดังนี้คือเครื่องรวมตัวอนุภาคแบบแผ่นขนานสองขั้ว (Bipolar Parallel-plate Agglomerator) มีวิธีการทำงาน  
เริ่มจากอนุภาคจะถูกอัดประจุบวกและอัดประจุลบ แล้วทำให้รวมตัวกันเป็นก้อนด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรง และ  
เครื่องรวมตัวอนุภาคแบบสนามไฟฟ้ากระแสสลับขั้วเดียว (Unipolar Alternating Electric Field Agglomerator) มี  
วิธีการทำงานเริ่มจากอนุภาคจะถูกอัดประจุให้มีขั้วเดียวก่อน จากนั้นทำให้สั่นด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ แอม  
30 พลิจูดของการสั่นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดและมวลของอนุภาคโดยจะมีขนาด 100 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคขนาด  
0.1-1 ไมโครเมตร อนุภาคจะตกตะกอนและรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่เคลื่อนที่แบบสั่นเนื่องจาก  
ประจุและการเคลื่อนตัว

## หน้า 2 ของจำนวน 3 หน้า

ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรนั้น สามารถให้เกิดการรวมตัวกันได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร เพราะในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรนั้นแอมพลิจูดของการสั่นจะเพิ่มตามขนาดของอนุภาค ขนาดของก้อนอนุภาคนั้นสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มความถี่ ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ความถี่ 50 Hz ก้อนอนุภาคจะมีขนาด 1 ถึง 8 ไมโครเมตรแต่ถ้าเพิ่มความถี่เป็น 300 Hz ก้อนอนุภาคจะโตขึ้นเป็น 30 ถึง 50 ไมโครเมตร เครื่องรวมตัวแบบไบโพลาร์เอซิดิซี นั้น อนุภาคจะถูกอัดประจุไฟฟ้าแบบสองขั้วจากการปล่อยประจุโคโรนาในแบบกระแสสลับ แล้วผ่านเข้าไปรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้นในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนเครื่องรวมตัวแบบคอคิวโพล (Quadrupole) นั้นมีการอัดประจุตรงแกนกลางของแท่งอิเล็กโทรดสี่แท่ง ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคขนาด 0.06 ถึง 1 ไมโครเมตรลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเทคนิคการทำให้อนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรมีขนาดใหญ่มากกว่า 10 ไมโครเมตรนี้ ทำให้การกำจัดอนุภาคออกจากกระแสก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพโดย เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ไชโคลน หรือแผ่นกรองและถุงกรองทั่วไป

สิทธิบัตร US 6,872,238 B1 ได้มีการประดิษฐ์เครื่องและวิธีการสำหรับรวมตัวอนุภาคที่ใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงแบบแผ่นขนานสองขั้ว ซึ่งวิธีการรวมตัวอนุภาคมีสองขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนแรกทำการอัดประจุอนุภาคให้มีประจุบวกและประจุลบ หลังจากนั้นจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันในขั้นตอนที่สอง โดยมีอิเล็กโทรดปล่อยประจุแบบพิเศษและกระตุ้นด้วยแรงดัน AC ที่มีรูปคลื่นแบบต่างๆ ทั้งยังมีการฉีดสารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาการรวมตัว ทำให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีวิธีการที่ยุ่งยาก

สิทธิบัตร US 6,136,256 ได้มีการประดิษฐ์เครื่องและวิธีสำหรับควบคุมการรวมตัวกันของอนุภาคฝุ่นโดยสามารถที่จะควบคุมให้อนุภาคฝุ่นเกิดการรวมตัวกันหรือแยกสลายตัวออกจากกันได้ ด้วยพลาสมาเรโซเนเตอร์ที่กระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิและการไหลของก๊าซ และรูปแบบแรงดันที่กระตุ้นพลาสมาทำให้วิธีการซับซ้อน อีกเรื่องเป็นพลาสมาที่ความดันต่ำจึงต้องทำในระบบปิดเท่านั้น

เครื่องรวมตัวอนุภาคเหล่านี้มีข้อจำกัด คือเนื่องจากการสลายตัวของประจุซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคทั้งสองมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากันแต่ต่างขั้วกัน ทำให้มันมีสภาพเป็นกลางไม่สามารถไปรวมกับอนุภาคอื่นให้มีขนาดใหญ่มากต่อไปได้อีก และการอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคขนาดนาโนเมตรด้วยการปล่อยประจุโคโรนากระแสตรงหรือโคโรนากระแสสลับนั้นทำได้ยาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของอนุภาคมีขนาดเล็ก ซึ่งแก้ไขโดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น แต่ไม่สามารถเพิ่มแรงดันได้สูงเกินกว่าแรงดันเบรกดาวน์ และการเกิดประกายไฟเนื่องจากการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่ออนุภาคมีความสภาพความต้านทานต่ำ ถึงแม้จะนำเอาเทคนิคการรวมตัวด้วยอัลตราโซนิคมาแก้ปัญหาดังกล่าว แต่ยังคงมีปัญหาเรื่องความสิ้นเปลืองพลังงานสูงและมีกระบวนการที่ยุ่งยาก มีส่วนประกอบที่ซับซ้อนทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้นทุนสูง

จากปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดแนวคิดในการนำเสนอ เครื่องและวิธีการรวมตัวอนุภาคขนาดนาโนเมตรให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วยเทคนิคที่มีประสิทธิภาพการรวมตัวสูง สิ้นเปลืองพลังงานต่ำและไม่เกิดการเบรกดาวน์ ต้นทุนต่ำ

**ลักษณะและความมุ่งหมายการประดิษฐ์**  
การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาที่ได้ชี้แจงไว้ข้างต้น โดยอุปกรณ์สำหรับรวมตัวอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรจากกระแสก๊าซ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบไม่เกิดความร้อนทำให้ก๊าซเกิด

## หน้า 3 ของจำนวน 3 หน้า

- การแตกตัวเป็นพลาสมาโดยที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อม เนื่องด้วยการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าในช่วงเวลาที่สั้นกว่าความถี่ของไอออนทำให้ไอออนไม่สามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นได้ทัน ทำให้พลังงานส่วนใหญ่ถ่ายเทค้ำกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะพุ่งชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้แตกตัวเป็นไอออนจำนวนมาก เมื่อผ่านอากาศที่มีอนุภาคปนเข้าไปในลำพลาสมา ซึ่งประกอบด้วยไอออนและอิเล็กตรอนจำนวนมาก ทำให้เกิดการอัดประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคในอัตราสูง และด้วยการไหลของก๊าซทำให้อนุภาคที่มีประจุต่างกันเหล่านั้นมารวมตัวกันมีขนาดใหญ่อขึ้น อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถสร้างได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และใช้พลังงานต่ำ ทั้งยังสามารถสร้างให้มีขนาดกะทัดรัดเหมาะสมกับการใช้งาน

**คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ**

รูปที่ 1 แสดงภาพเครื่องรวมตัวอนุภาคนาโนเมตรในเมตรตามการประดิษฐ์นี้

10 **การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์**

- ตามรูปที่ 1 แสดงเครื่องรวมตัวอนุภาคนาโนเมตรให้มีขนาดใหญ่อขึ้นด้วยพลาสมาที่ไม่เกิดความร้อนตามการประดิษฐ์นี้ ที่ประกอบด้วย พลาสมาวีแอกเตอร์ (1) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยช่องทางไหลของอากาศ (2) ที่ภายในติดตั้งมีอิเล็กโทรดปล่อยประจุ (3) และอิเล็กโทรดกราวด์ (4) โดยที่อิเล็กโทรดปล่อยประจุต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์ (5) ซึ่งประกอบด้วยชุดสร้างพัลส์ (6) และหม้อแปลงแรงดันสูงแบบพัลส์(7) สำหรับกระตุ้นอิเล็กโทรดปล่อยประจุ (3) โดยที่อิเล็กโทรดทั้งสอง คือ (3) และ(4) ทำจากวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์(5) กระตุ้นอิเล็กโทรดปล่อยประจุด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงที่มีความกว้างพัลส์น้อยกว่า 1 ไมโครวินาที ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 15 กิโลโวลต์ และความถี่ที่เหมาะสมจนเกิดการปล่อยประจุกระตุ้นโมเลกุลของอากาศที่ผ่านเข้ามาแตกตัวเป็นไอออนจำนวนมากก่อตัวเป็นลำพลาสมาขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด (3) และ (4) เมื่ออากาศที่มีอนุภาคนาโนเมตรเล็กกว่าไมโครเมตร ไหลผ่านเข้ามาในช่องทางไหลของอากาศ (2) ดังแสดงในรูปที่ 1 ทิศทางการถูกสร้งด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม อนุภาคนาโนเมตรจะถูกอัดประจุภายในลำพลาสมา ทำให้อนุภาคนาโนเมตรเหล่านั้นมีทั้งประจุบวกและลบ และด้วยการไหลของอากาศและแรงดูดอ้อม ทำให้อนุภาคนาโนเมตรเล็กกว่าไมโครเมตรเหล่านั้นเกิดการรวมตัวกันภายในวีแอกเตอร์(1) แล้วมีขนาดโคขึ้นกว่าสิบไมโครเมตร

**วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด**

เหมือนกับที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

25 **การประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม**

- การประดิษฐ์ที่ขอรับสิทธิบัตรจะนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากโดยใช้ร่วมกับ เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ไซโคลน แผ่นกรอง หรือถุงกรอง เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคนาโนเมตรเล็กสูงขึ้นไป เช่นใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยอนุภาคนาโนเมตรขนาดเล็กที่ปลดปล่อยจากเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 50 นาโนเมตรเป็นอันตรายต่อระบบหายใจของมนุษย์ และเครื่องรวมตัวอนุภาคนาโนเมตรให้มีขนาดใหญ่อขึ้นด้วยพลาสมาที่ไม่เกิดความร้อนยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการสร้างผงหรือก้อนขนาดใหญ่จากอนุภาคนาโนเมตรหรือโมเลกุลก๊าซ และในอุตสาหกรรมการปรับปรุงผิววัสดุ

**CURRICULUM VITAE**

**Name** Mr. Vishnu Thonglek

**Date of birth** 18 December 1970

**Educational Background** BS.Tech.Ed. degree in Electrical Engineering  
from Rajamangala University of Technology Lanna  
in 1993

M.Eng degree in Electrical Engineering  
from Chiang Mai University in 1999