

전기집진장치에서 가스의 물리적인 특성에 따른 포집구역내의 입자포집율 연구

하 상 안 · 임 경 택 · 신 남 철*
독일 파다본 대학교 공정공학 연구소 · 동아대학교 환경공학과
(1997년 8월 9일 접수)

A Study on the Mass Collection Efficiency in Collector Step of Electrostatic Precipitator by Physical Gas Characterization

Sang-An Ha, Gyong-Teck Lim*, and Nam-Chul Shin*
Dept. of Mechanical Process Engineering, Paderborn University, Germany
*Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University, Pusan, 604-714, Korea
(Manuscript received 9 August 1997)

This study was carried out to investigate the collection Efficiency of mass in collector step at the different of physical gas characterization. This work has focused on the dependence of the collection efficiency of mass in the collector zone of a two-stage set up field with gas temperature T and the dew point tmeperature. To identify the dependence of the mass collection efficiency on the grounded plate of the collector zone $M_{p,k}$ by the specific electric resistance of dust ρ_e and the relative humidity φ , 20 attempts have been made with three different gas temperature (50°C, 80°C, 110°C) at different dew point. At the specific electric resistance of dust $\rho_e=10^6 \Omega m$ which relative humidity corresponds to $\varphi > 15\%$, a easy rise of the grounded plate secluded dust mass share was measured again. As the result of the higher cohesion imprisonment power due to the adsorbtion of particle, the rise of the relative humidity developed on the particle surface. Therefore, the collection efficiency of mass was not predominant the high temperature T in the collector zone, neither was the pecific ellectric resistance of dust dependent.

Key word : temperature of dew point, collector step, specific electrolytical dust resistance, relative humid, dust mass distribution

1. 서 론

우리 인간이 살고 있는 환경에서 발생하는 오염물은 산업혁명 이전에는 자연의 자정작용과 생태계의 순환에 의해서 처리되었지만, 인구증가와 산업발전 및 도시집중 등으로 인하여 자정작용 범위를 넘어선 양의 오염물이 발생되어 이를 제거하기 위해 다양한 오염방지 시설 분야가 개발되어 왔다.

그러나 오염방지기술개발에 대한 시설공정의 정확한 인식과 효율적인 운전을 위한 고도의 측정기술개발이 요구되어지고 있는 실정이다. 특히 산업시설에서 배출되는 대기오염물질을 제거하기 위해서는 전기집진장치 및 다양한 필터시설이 설치되어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 전기집진장치를 운전하는데 있어 기본적으로 연구되어야 될 오염배출원의 물리적인 특성에 따른 장치의 효율적 이용을 위하여 집진율과 전기적인 특성 관계를 정확하게 측정하는 것이 주목적이다.

2. 장치이론

전기집진장치에 의한 집진과정은 4단계로 분류되어진다(R. Rennhack, 1987). 본 연구장치에 공급된 가스 입자는 코로나 방전에 따라 가속된 전자로 인해 가스는 이온화되어지고, 이들의 이온과정에서 입자들은 전계를 형성하게 되어진다. 코로나 방전현상은 (-)로 하전된 입자들은 Coulomb력에 의해서 (+)극인 집진극 내의 포집구역에서 포집 되어지거나, 입자들은 응집형성에 의해서 포집부로 침강되어져서 제거되어 진다.

전기집진과정에서 입자하전 현상은 입자크기에 따라서 충돌대전과 확산대전으로 분류되어 진다. 입자경이 큰 먼지입자($x \geq 1 \mu m$)의 하전과정은 전계내의 강도에 따라서 결정되어지므로 전계대전 또는 충돌대전으로 분류되어진다(White, 1969). 입자경이 큰 입자들의 대전과정은 전계강도에 따라서 결정되어지고, 입자경에 의해서 큰 영향을 받지 않는다(Ha, 1995). 입자분포경이 ($x \leq 1 \mu m$)인 경우 대전현상은 가스이온의 브라운 운동에 의한 확산에 의해서 하전되어지므로써, 이 대전현상을 확산대전이라 정의한다(R. Rennhack, 1987). 입자들의

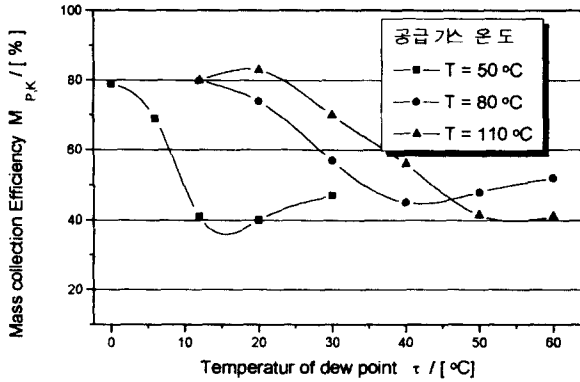


Fig. 1. Schematic diagram of electrostatic precipitator.

대전현상에 따라서 발생하는 입자운동에 의한 이론적 이동속도 W_{th} 는 입자운동의 저항력과 전계력에 관계되는 Coulomb법칙과 입자운동에 의한 Stokes법칙을 응용하여 공식 (1)과 같이 적용할 수 있다.

$$W_{th} = \frac{(C_U \cdot Q \cdot E_p)}{(3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p)} \quad (1)$$

식 (1)에 묘사되어진 이동속도 W_{th} 는 입자들이 집진되어지는 과정에서 입자경에 따라서 물리적 특성을 증명하기 위해서 적용되어진다. 이론적인 이동속도를 적용하여 장치의 집진효율 η 이 계산되어진다. 집진효율은 Deutsch모델에 의해서 계산되어진 값과 비교하여 장치의 효율을 결정할 수 있다.

$$\eta_E = 1 - \frac{C_{입자}}{C_{공기}} = 1 - \frac{-W_c \cdot A}{V} \quad (2)$$

본 연구에서는 장치의 포집효율을 실질적으로 측정하기 위해서 포집부의 질량분포량을 측정하므로써 이론적인 방법과 달리 연구되어졌다.

3. 실험 및 장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 공기의 공급은 흡입송풍기(V1)에 의해서 공급되어졌고, 공기량은 벤투리관을 이용하여 정확한 양이 측정되어졌다. 공급되어진 가스의 온도조절은 전기전열기(H1)에 의해서 조절되어졌고, 이 온도는 온도측정기에 의해서 자동적으로 측정되어졌다.

증기 발생은 H2의 증발기에 의해서 가스의 Dew Point 온도를 조절하면서 가스가 공급되어졌다. 전기집진장치의 Corona발생과 입자하전을 위한 고전압 발생 장치는 단파정류에 직류고전압을 발생시켜 0-100KV로 가변시켜 공급되어졌다. 전기집진 장치에서 사용된 집진 대전판의 구조는 2단형으로 구성되어졌고, 대전판은 전체길이 1440mm, 높이 500mm, 폭 400mm 이다. 집진체는 2단계로 설치되어져 있는데, 1단계의 전계구역에서는 입자하전을 위해서 사용되어지고, 2단계의 전계구역에서는 공급되어지는 입자의 농도가 일정하게 분포되어지도록 하기 위해서 설치되어졌다. 전체 집진체 중 1단계의 대전판에서 가스를 포집하기 위한 면적은 1.44m²이다. 대전체의 포집극(collecting o. passive

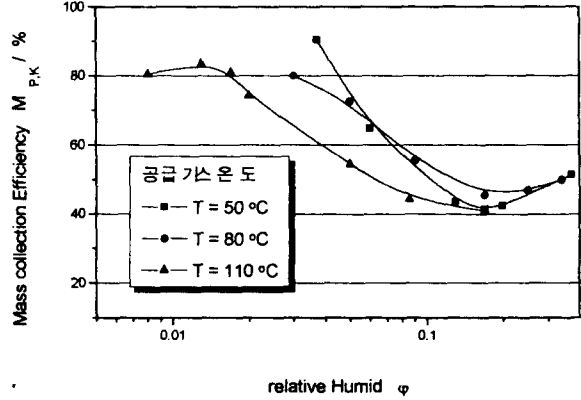


Fig. 2. Variation of mass collection efficiency(%) as a function of dew point temperature and inlet gas temperature.

electrode)은 ZT전극이 사용되어졌고, 하전극(emission electrode)은 6개의 극으로 구성되어 있다. 1단계의 집진체의 포집극 밀부분에는 6개의 포집통이 부착되어져 있다. 이 포집통에서 포집된 량에 의해서 포집구역에서 집진된 량을 정확하게 측정할 수 있다. 2단계 대전판의 포집극(collecting o. passive electrode)에는 이온화 구역이 450mm와 5개 판을 가진 하전극으로 구성되어져 있으며 이들의 방전극의 판간격은 100mm로 구성되어져 있다. 2단계 대전판에서 이온화구역의 포집된 량은 B9-B10 사이의 량이고, 포집극에서 집진된 량은 B11-B14구간의 량으로 구분하여 측정할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 집진과정에서 실행된 결과를 고찰하기 위해서 집진체의 전 단계 중 2단계의 대전판에서 발생하는 2단형 극성구조를 가진 대전체에서 발생한 집진과정의 포집되어지는 량을 측정하였다. 대전체의 포집구역에서 포집된 전체 먼지량 $M_{k,i}$ 는 양전자로 하전된 입자들이 대전판에 포집된 $M_{p,i}$ 량과 음전자로 하전된 입자들이 대전판에 포집된 $M_{n,i}$ 량을 이용하여 전체입자질량분포량은 식(3)을 적용하여 결정할 수 있다.

$$M_{k,i} [\%] = M_{p,i} [g] / M_{N,i} [g] \cdot 100\% \quad (3)$$

먼지농도의 결정은 TA-Luft(1989)의 기술적 제안을 근거로 하여 벤투리공식(A. Leistner, 1993)에 의해서 가스용적 V_n 이 계산되어진다.

집진체의 2단계 대전판 전계에서 발생되어진 먼지농도는 포집부의 B9 - B14의 구간에 집진된 입자량과 V_n 값을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_{2roh} = C_{rein} + \sum_{i=9}^{14} M_{B,i} / V_n \quad (4)$$

여기에서 C_{2roh} 는 집진체의 2단계 전계구역에서 부하된 먼지부하량, C_{rein} 는 정화된 먼지량, $M_{B,i}$ 는 포집부 i단의 포집량, V_n 는 표준상태에서 1단 내의 건조가스용적을 의미한다. 장치 내의 집진효율의 결정은 주입부 1단

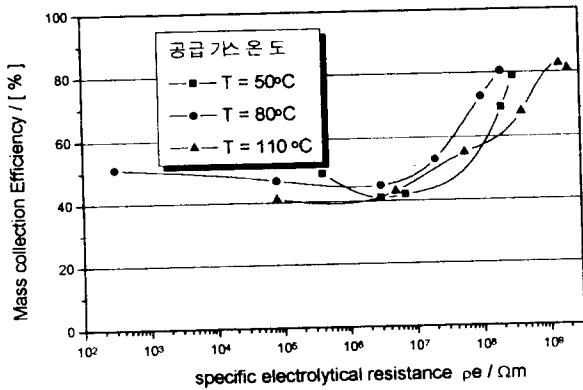


Fig. 3. Variation of mass collection efficiency(%) as a function of relative humidity and inlet gas temperature.

계에서 배출부의 포집 $i-1$ 단계까지 포집된 량의 관계에 따라서 결정되어진다.

$$\eta_i = 1 - C_{i+1,E} / C_{i,E} \quad (5)$$

2단계의 대전판 내의 전기구역에서 발생된 집진율은 정화농도 C_{rem} 량과 포집부 B9의 농도관계에 의해서 계산되어진다. 본 연구에서 공급되어지는 가스의 물리적인 특성에 따라서 집진포집량에 영향을 미치는 측정매개변수로서 고찰되어진 가스의 상대습도율 ϕ 관계는 가스온도 T 에 의한 포화수증기압과 dew point 온도 t 에 의한 포화수증기압의 관계에 따라서 결정되어진다.

$$\phi = P_D / P_{D,s} \quad (6)$$

이 공식에서 정의되어진 상대습도율 ϕ 관계를 고찰하기 위해서 본 연구에서 사용되어진 가스온도 T 는 50-110°C와 dew point 온도 t 는 -1-60°C의 범위내에서 측정되어졌다. 이들 가스의 물리적인 특성에 따라서 공급되어진 먼지농도는 400-1200mg/m³ 범위에서 공급되어졌으며, 2단계의 집진대전체 내의 먼지 농도가 일정하게 유지되지 않았다. 집진장치의 가스농도가 공급되어지는 동안 결정매개 인자로서 사용된 변수는 가스속도 $v > 1m/s$, 2단계 대전체의 이온화구역흐름밀도 $J_{2,i} = 0.05mA/m^2$, 포집부 전계에 공급되어진 고전압 $U_{2,k} = 35KV$ 로 일정하게 공급되어졌다. 장치의 운전시간은 시운전의 결과에 따라서 2단계의 대전체 이온화구역에서 부하되어진 먼지량에 의해서 공급되어질 고전압을 결정한 후에 결정되어졌다. Fig. 2에서 묘사되어진 바와같이 입자포집율은 일정한 가스온도의 조건에 따라 dew point 온도 t 의 변화에 의해서 큰 영향을 미침을 볼 수 있다. 일정한 가스공급 조건에 따라서 입자포집분포율은 약간의 차이가 있지만, 가스온도와 dew point 온도의 경도차가 클수록 접지된 대전판에 포집된 량은 80% 이상으로 포집이 증가되어 짐을 볼 수 있다. dew point 온도 t 의 증가에 따라서 접지된 대전판의 포집구역에서 집진된 먼지량 $M_{p,i}$ 는 최소 40%까지 감소되어졌다. Fig. 2에서 공급가스 온도가 80°C인 경우에는 dew point 온도 t 가 40°C 이상으로 증가함에 따라서 집진극에 포집된 먼지의 량이 다시 약간 증가되어졌다.

이들의 측정결과에서 보면 $M_{p,i}$ 율은 공급가스온도가 낮을수록 감소되어진다.

일반적으로 일정하게 주어진 온도조건에서 포집구역내에 포집된 질량포집율 $M_{p,i}$ 은 dew point 온도 t 에 따라서 결정되어졌지만, 공급되어진 가스온도에 따라서 $M_{p,i}$ 율의 편차는 온도조건 이외 다른 물질적 특성에 의해서도 결정되어짐을 추측할 수 있다. 일정하게 공급되어진 가스온도에서 가스속에 포함된 상대습도율의 관계에 따라서 $M_{p,i}$ 율의 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

공급되어지는 가스에 함유된 상대습도율에 따른 입자들의 부착력에 대한 Batel의 연구보고(W. Batel, 1959)에서 표준상태의 대기습도 조건에서 실행된 건조한 미세입자의 부착력은 상대적으로 습도를 함유한 입자들보다 적게 발생하는 것으로 보고되어졌다. 상대습도관계가 입자의 부착력에 미치는 영향을 보면 입자표면적에 물분자층이 흡착되어지게 함으로써, 입자들이 서로 부착하는 힘이 증가되어진다. 습도를 상대적으로 함유한 입자들을 흡착력이 증가하는 이유는 입자들의 흡착층 내에 물리화적으로 수소고리(hydrogen bridge)가 우세하게 존재함으로써, 입자들은 강한 극성을 띄게된다. 이들의 입자들은 발생한 강한 극성에 의해서 높은 부착력을 가지게 된다. 상대습도관계는 일정한 범위내에서 상대습도 ϕ 가 높을수록 입자표면적에 많은 흡착층이 형성되어지고, 또한 부착력이 증가되어진다. 입자표면내에 부착력의 증가는 입자종류에 따라서 결정되는 흡착력에 의해서 결정되어진다. 입자들의 부착력은 입자의 크기에 따라서 비례적으로 감소한다. 먼지 mass 포집분포율 $M_{p,i}$ 에 영향을 미치는 상대습도율 ϕ 의 측정결과에서 보면 $\phi < 10\%$ 인 경우 상대습도율이 증가함에 따라 공급가스의 온도변화에 관계없이 $M_{p,i}$ 율은 감소하였고, 대부분의 먼지입자는 접지된 포집극의 대전판에서 제거되어졌다. Fig. 3의 결과를 살펴보면, 일정한 가스의 온도조건에서 상대습도율 15-20% 범위 내에서 입자의 mass 포집분포율이 최소가 되었으며, 상대습도율은 집진장치의 포집극에서 포집되는 $M_{p,i}$ 율에 직접적인 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 상대습도율 $\phi < 15\%$ 범위내에서, 공급되는 가스온도에 따라서 $M_{p,i}$ 분포율의 편차에 대한 의미는 포집극 내에서 포집되어진 량의 변화가 다른 물리적인 특성에 의해서 영향을 미침을 추측할 수 있다. 특히 공급되어진 가스온도 T 와 dew point 온도 t 에 따라서 큰 영향을 미치는 먼지비저항계수 ρ_e 은 Fig. 4의 측정결과에서 보면 포집효율의 결정인자 임이 증명되어졌다. Fig. 4의 측정결과에서 보면, 공급가스의 온도변화에 의한 mass 포집분포율 $M_{p,i}$ 의 변화는 적었고, 이 결과에 의해 포집구역 내에 포집되는 먼지 mass 분포율에 먼지비저항계수가 어떻게 영향을 미치는가 추측할 수 있다. 먼지비저항계수가 $10^9 \Omega m$ 정도에서 포집구역 내의 접지된 대전판에 포집된 $M_{p,i}$ 율은 증가되어졌고, $10^9 \Omega m$ 이상의 범위에서는 $M_{p,i}$ 율이 다시 약간 감소되어졌다.

공급가스 온도조건이 80°C와 50°C의 결과에서 보면, $\rho_e < 10^8 \Omega m$ 범위 내에서는 먼지비저항계수가 감소함에 따라서 $M_{p,i}$ 율이 감소되어졌고, $\rho_e = 10^6 - 10^7 \Omega m$ 범위 내에서 $M_{p,i}$ 율이 최소로 발생되어졌다. 그리고 ρ_e

$<10^6 \Omega m$ 범위내에서는 $M_{p,1}$ 율은 50% 범위 내에서 약간 증가되어 졌다.

공급가스 온도가 110℃의 경우에는 먼지비저항계수 $\rho_c < 5 \times 10^4 \Omega m$ 범위에서 $M_{p,1}$ 율이 최소를 나타내었으며, 먼지비저항계수가 증가함에 따라서 계속적으로 $M_{p,1}$ 율이 증가되어 짐이 증명되어 졌다. Fig. 4의 측정결과에서 보면 먼지비저항계수 $\rho_c < 10^9 \Omega m$ 범위에서 $M_{p,1}$ 율의 감소는 전계의 역흐름에 의해서 발생되어 졌다(White, 1969). 전기집진장치에서 일정하게 주어진 먼지비저항계수값의 한계에서 벗어나면 이온화 구역의 포집극은 전계역흐름이 발생되어진다. 먼지비저항계수 ρ_c 이 높은 경우 전하가 느리게 하전되어 짐으로써, 포집극의 먼지층 내에 전압강도(potential)가 증가되어진다. 먼지층 내의 전압강도의 증가에 의해서 먼지층은 분리되어지고, 입자들의 이온화에 의한 하전과정에서 이온들이 변환하는 과정에서 약화된 전압강도는 다시 증가되어진다. 전계내에 증가된 전압강도에 따라서 양전자로 하전된 가스이온은 음전하로 하전된 입자를 부분적으로 중화시키고, 전하는 다시 변화되어진다. 포집극 내에서는 입자들의 전하를 양전자로 많이 발생시키므로써, 음전하로 접지된 대전판에서 많은 입자들이 포집되어진다. 특히 전기집진 이론에서 먼지비저항계수가 $10^8 - 10^9 \Omega m$ 범위에서 접지된 대전판에서 먼지량이 우세하게 포집되어 짐이 보고되어 졌다(Gaylor u.w. Penney, 1962). 전기집진과정에서 포집된 $M_{p,1}$ 율과 본 연구결과와 참고문헌에서 기술되어진 바와 같이 이온화구역에서는 음전하로 하전된 입자들이 $\rho_c > 10^9 \Omega m$ 범위에서는 입자하전이 느리게 발생되어 졌다. 이들의 범위 내에서 음전하로 변환하는 과정에서 약화된 입자들이 접지된 포집극에서는 다시 전하를 전자로 전환하여 입자들의 부착력을 증가시킴으로써, 집진효율은 증가되어진다.

먼지비저항계수가 $\rho_c > 10^8 \Omega m$ 범위에서는 $M_{p,1}$ 율이 최소로 도달되어지고, 접지된 대전판에서 제거된 먼지량은 40%까지 감소되어 졌다. 먼지비저항계수값이 감소함으로써, 입자들은 포집부의 대전체표면적 내에 전계력이 약하게 변화되어 짐으로써 입자들의 하전은 유도하전 현상으로 변환되어진다. 이 효과는 낮은 먼지비저항계수에서 더욱 증가되어진다. 이들의 낮은 범위의 비전계 먼지저항에서는 하전된 입자들이 전계 내에서 변환되는 시간이 짧기 때문에 입자와 접지된 대전판 표면적 내에서 입자들이 접촉과 부착에 의해서 발생하는 전기적 부착력이 충분히 형성하지 못하기 때문이다(Gaylor u. w. Penney, 1962).

5. 결 론

본 연구의 결과 및 고찰에서 설명되어진 바와 같이 입자포집율은 가스공급조건에 따라서 약간의 차이가 있지만, 가스의 물리적인 특성인 가스온도와 dew point 온도, 먼지저항계수, 가스의 상대습도율에 따라서 큰 영향을 미침을 볼 수 있다.

1) 온도의 변화에 따른 입자포집율은 가스온도와 dew point 온도의 경도차가 클수록 대전판의 집진극에 포집된 양은 80%이상으로 증가되어 짐을 볼 수 있다.

2) dew point온도r값이 증가함에 따라서 집진극에서 포집되어지는 $M_{p,1}$ 량은 최소 40%까지 감소되어 졌고 공급가스온도 80℃와 110℃인 경우 dew point가 증가할수록 집진극에 포집되는 양은 감소되어 졌다.

이들의 결과에서 공급가스온도는 집진장치의 운전과정에 주요 매개변수로 작용되어짐을 볼 수 있다.

3) 공급가스 온도조건이 80℃와 50℃의 결과에서 보면, $\rho_c < 10^8 \Omega m$ 범위 내에서 저항계수의 값이 감소할수록 집진율 $M_{p,1}$ 값이 감소되어 졌고 $\rho_c < 10^6 \Omega m$ 범위내에서 $M_{p,1}$ 값은 50%범위내에서 약간 증가되어짐을 알 수 있었다.

4) 먼지의 비저항계수값이 $10^5 \Omega m < \rho_c < 10^9 \Omega m$ 범위에서 ρ_c 값이 증가함에 따라서 포집율은 증가되는 것을 확인할 수 있었다. ρ_c 값의 증가에 따라 $M_{p,1}$ 값이 증가되는 이유는 전계내의 입자의 전하가 느리게 하전되어짐으로써 포집극내의 먼지층의 전압강도가 증가되어진다. 이들의 전압강도는 양전자로 하전된 가스이온을 부분적으로 음전하로 중화시키지만 전하를 다시 양전자로 발생시켜 포집량이 증가되는 것을 볼 수 있다.

먼지저항계수 ρ_c 값은 접지된 포집극의 전계내에서 입자의 효과적인 포집을 위한 전계력의 저항정도로 전기적인 효과의 측정인자로 고려되어 졌다.

5) 상대습도율은 입자의 흡착력에 관계되어진다. 습도를 함유한 입자가 흡착력이 증가하는 이유는 입자들의 흡착층내에 물리학적 수소고리가 우세하게 존재함으로써 입자들의 강한 극성에 의해 부착력이 증가되어지는 것을 알 수 있다.

6) 상대습도율 ϕ 의 측정결과에서 보면 $\phi < 10\%$ 범위에서 상대습도율의 값이 증가에 따라 온도변화와 상관없이 $M_{p,1}$ 값은 감소되어 졌고, 온도조건에 따라서 상대습도3% $< \phi < 7\%$ 범위가 최적조건으로 나타났다.

입자상 물질에 함유한 습도관계는 일정한 상대습도율의 조건에서는 입자들의 부착력을 증가하게 함으로써 포집효과에 미치는 인자로 고려되어져야 함이 증명되어 졌다.

참 고 문 헌

- 임경택, 1989, 대기오염방지공학, 동화기술, 185-189.
- A. Leistner, 1993, Untersuchungen zur Abscheideeffizienz bei enem Elektrofilter in zweistufiger Bauweise, Diplomarbeit, Universität Paderborn.
- Anthony J. Bounicore, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632.
- Gaylor u.w. Penney, 1962, Electrical Precipitation for Air Conditioning Applications, Adhesion of Dust, 3-4.
- H.j. White, 1969, entstaubung industrieller Gase mit Elektrofilter, VED DT, Verlag feur Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Louis Theodore, 1982, Air Pollution Control Equipment, 283-291.
- R. Rennhack, 1987, staubabscheidung im Elek-

- trofilter, in Handbuch des Umweltschutzes II - 2 10.5.1 ecomed Verlag.
- R. Westmantlelman, 1991, Analyse des Betriebsverhaltens eines Elektrofilters zur Entstaubung von Offenabgase in der Zementindustrie, Diplomarbeit, Universtt Paderborn.
- S-A Ha, 1995, Auswirkung der Abreinigung der Plattenelektroden den Abscheidegrad bei einem Elektrofilter in zweistufiger Bauweise, Fachtagung Verfahrenstechnik in Unversitaet Padboren.
- TA-Luft, 1989, Deutschland.
- W. Batel, 1959, Ueber die Haftfaehigkeit trockener feinkoemiger stoffe, Chemie-Ing. Techn. Nr5., 343-345