

تصميم وصيانة المرسل الكهروستاتيكي نوع (Duct)

فاضل خدام قليفل أزهر عبد الزهرة رحيم عدنان مرموص منصور
جامعة كربلاء- كلية العلوم – قسم الفيزياء

الخلاصة:-

يعرض هذا البحث برامج رياضية لتصميم وصيانة المرسل الكهروستاتيكي باستخدام طريقه (Finite Difference Method) لحل معادله بوازن و معادله استمراريه التيار وطريقه (Trapezoidal Rule) لإيجاد المجال الكهربائي، يمكن استخدام البرامج للتنبؤ بمنحني الفولتية والتيار للمرسل الذي يعتبر وسيله مهمه لتحديد كفاءه الترسيب حيث يبدأ البرنامج بحساب توزيع الجهد وشحنه الفراغ في مجال المرسل و من ثم التأكد من صحه النتائج بمقارنتها مع النتائج العمليه و في هذا البحث أيضا تم حساب كفاءه الترسيب وتأثير كل من سرعه الغاز، كثافه الجسيمات والمسافه بين لوح الترسيب وسلك التفريغ على كفاءه المرسل.

المقدمه :-

أحد أهم العوامل التي تلوث البيئه وتهدد الحياه على كوكبنا هو تلوث الهواء الناتج من المواد السامه المنبعثه من المصانع مثل (مصانع الأسمنت، محطات توليد الطاقه الكهربائيه وغيرها) والمرسل الكهروستاتيكي هو الوسيله الأكثر فعاليه في تنقيه الغازات السامه المنبعثه من هذه المصانع ، لذا نرى من المناسب الدخول في بناء برامج رياضيه (Mathematical Programs) لتصميم وصيانة المرسل الكهروستاتيكي نوع (wire-plate) الشائع الاستعمال بسبب قابليته على إمرار كميه أكبر من الغاز داخل المرسل [1].

يمكن (Adamiak) [2] من أيجاد الخصائص الكهربائيه للمرسل الكهروستاتيكي نوع (duct) (عبارة عن لوحين متوازيين يربطان إلى الأرض لترسيب الجسيمات السامه ويوضع في منتصف المسافه بينهما أسلاك التفريغ التي تربط إلى مصدر الفولتية العاليه للحصول على التفريغ الكهربائي) باستخدام (Boundary Element Method and Method of Characteristics) (BEM-MOC) في حل معادلتى استمراريه التيار ومعادله بوازن لإيجاد توزيع الجهد وكثافه التيار لمقطع المرسل بصوره كامله (Full section) وقد أستخدم (Rajanikanth) [3] أنموذج رياضي بعد تطويره لتحديد خصائص الفولتية -التيار للمرسل الكهروستاتيكي نوع (duct) أثناء عمل المرسل أي يكون محمل بالغاز (duct) ودرس تأثير خصائص نبضه الفولتية على منحني الفولتية -التيار للمرسل ، وتمكن أيضا (Rajanikanth) [4] من استخدام (Finite Difference Method) لدراسه خصائص الكهربائيه للمرسل الكهروستاتيكي نوع (duct) وحل معادله استمراريه التيار ومعادله بوازن للتنبؤ بخصائص منحني التيار- الفولتية ، كما أستطاع استخدام أسلوب المحاكاه للحاسبه كوسيله لتصميم وصيانة المرسل وذلك من خلال مقارنه منحنيات الفولتية-التيار تحت تأثير مجموعه من العوامل الداخلة في تصميم المرسل مثلا (نوع سلك التفريغ، المسافه بين سلكيين متجاورين، المسافه بين لوح الترسيب وسلك التفريغ وغيرها)، وأستعمل (Rajanikanth) [5] أسلوب

Boundary Element Method and Finite Difference Method (BEM-FDM)

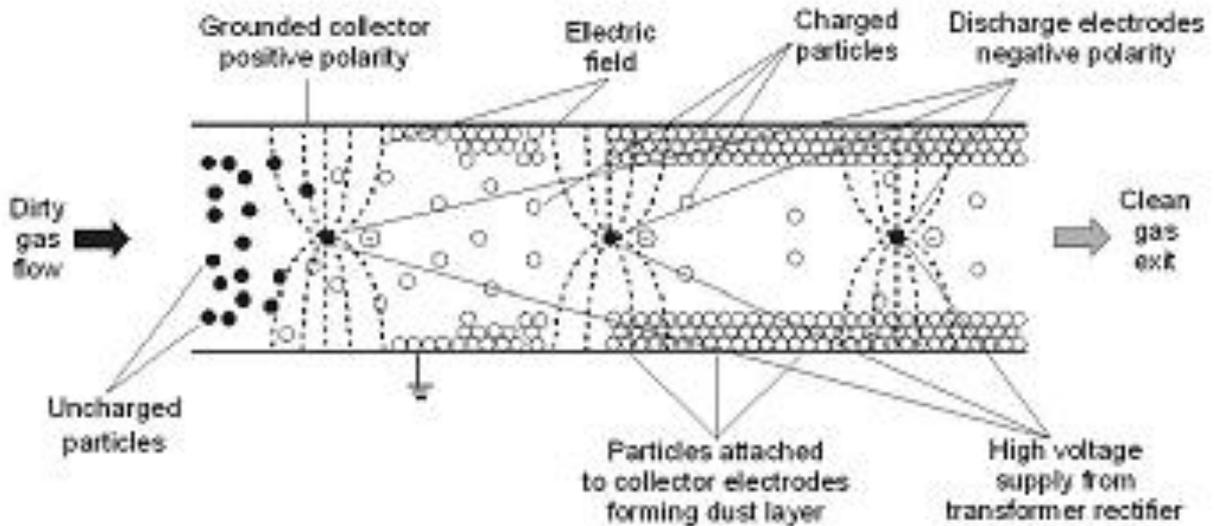
لحل معادلتى استمراريه التيار ومعادله بوازن لإيجاد منحني الفولتية - التيار وقد قام بتقسيم مجال المرسل (problem domain) إلى أجزاء متناظره والاستفاده من خاصيه التناظر بين الأقسام لحساب توزيع الجهد لربع الحيز وبذلك تمكن من تقليل وقت أنجاز البرنامج .

أما (Bergeles) [6] فقد أستخدم Finite Difference Method لشبكه ذات شكل منحني الأضلاع في أيجاد توزيع الجهد وكثافه التيار بحيث تمكن من تقليل نسبه الخطأ في أيجاد الجهد وكثافه التيار في المناطق القريبه من سلك التفريغ، بالإضافة إلى منحني الفولتية التيار هنالك العديد من النماذج الرياضيه (model mathematical) التي اقترحت من قبل الكثير من الباحثين حيث قام (Cooperman) [7] بتطوير النظرية التي وصفها [8] (Deutsch) لحساب كفاءه المرسل حيث أهمل الأخير الاضطراب الذي يحصل أثناء جريان الغاز داخل المرسل ولكن بالمقابل أهمل (Cooperman) الجسيمات المشحونه الراجعه (re-entrainment) إلى جريان الغاز الخارج من المرسل والتي لم يتم ترسيبها ، ودرس (Leonard et. al.) [9] انتشار الجسيمات داخل المرسل واعتبر إن سرعه الجسيمات منتظمه في جميع أجزاء المرسل ، في حين اقترح (Zhibin and Guoquan) [10] إن انتشار

الجسيمات في المنطقه القريبه من لوح الترسيب يختلف عن الذي يحصل في قلب (core) الجريان .أما (Yoo) [11] فقد درس تأثير الجريان المضطرب على كفاءه الترسيب .وقدم (Kim et. al) [12] أنموذج رياضي للتنبؤ بكفاءه المرسب بالاعتماد على التوزيع الحجمي للجسيمات الداخلة للمرسب .
في هذا البحث تم دراسته تأثير مجموعه من العوامل على كفاءه الترسيب وهي سرعه الغاز داخل المرسب وكثافه الغاز المناسب بالإضافة إلى المسافه الفاصله بين سلك التفريغ ولوح الترسيب بالاعتماد على معادله استمراريه الكتله (mass balance)

التفريغ الهالي Corona discharge

عبارة عن توهج أزرق مضيء يحدث بسرعه عاليه (أجزاء من الثانيه) في مساحه صغيره حول أسلاك التفريغ عند زياده الفولتية المطبقه على الأسلاك تدريجيا ونتيجه لحصول التفريغ الكهربائي تتأين جزيئات الغاز القريبه من السلك وتتحرر الإلكترونات التي تكون سرعتها عاليه بتأثير المجال الكهربائي القوي في المنطقه القريبه من السلك وبذلك تتأين جزيئات أخرى بفعل السرعه العاليه للإلكترونات والتالي نحصل على مزيدا من الإلكترونات والايونات الموجبه وعند حركه الإلكترونات بعيدا عن منطقه المجال الكهربائي القوي تتباطىء سرعتها ومن ثم تقتنص من قبل جزيئات الغاز وتتكون الأيونات السالبه التي بدورها تقتنص أيضا من قبل الجسيمات الداخلة إلى المرسب وبذلك تتم عمليه شحن هذه الجسيمات السامه المراد ترسيبها على اللوح ، وتمكن (Hideyuki et.al) [13] من قياس التيار الناتج عن التفريغ الهالي وأستخدم قيمته لتخمين معدل تركيز الأيونات في منطقته الشحن .



الشكل (1) يوضح التفريغ الهالي المتضاعف [14]

الأنموذج الرياضي (Mathematical Model)

يتكون المرسب الكهروستاتيكي نوع سلك- لوح (wire – duct) من سلسله أسلاك التفريغ الكهربائي (electrical discharge) التي تربط إلى مصدر الفولتية العاليه و تثبت هذه الأسلاك في منتصف المسافه بين لوجي الترسيب اللذان يربطان إلى الأرض والجسيمات السامه الداخلة إلى المرسب يتم شحنها بتأثير الأيونات الناتجه عن

التفريغ الكهربائي في المنطقه القريبه من السلك أما المعادلات التي تتحكم بتوزيع الجهد وكثافه التيار في المرسب هي معادلتى بوازن ومعادله استمراريه التيار.

يتضمن الأنموذج الرياضي الذي أستخدم في هذا البحث لحل هاتين المعادلتين الفرضيات التاليه [5]
-أن الفولتية المطبقه على سلك التفريغ تكون DC.

-عدم جود الغبار (dust free) في المنطقه بين أسلاك التفريغ وألواح الترسيب (أي إن المرسبه خاليه من الغاز وهي مرحله الفحص بعد الانتهاء من عمليه التصميم والتصنيع) .

إن المرسب يعمل تحت الظروف القياسيه من ضغط ودرجه حراره وتكون حركيه (Mobility) حاملات الشحنة منتظمه وباستخدام المحاور المتعامده في حل المعادلات (بوازن ،استمراريه التيار) نجد المجال الكهربائي وشحنه الفراغ(space charge) من المعادلات التاليه [4] :-

$$\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E = -\nabla V \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla \cdot j = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$J = \rho b E \quad \dots\dots\dots (4)$$

حيث أن E: المجال الكهربائي ، ρ : كثافه الشحنة ، ϵ_0 : سماحيه الفراغ ، J: كثافه التيار ، b: حركيه الأيونات
V : الجهد الكهربائي .

ومن المعادلتين (1) ، (2) و(3) ،(4) نحصل على :

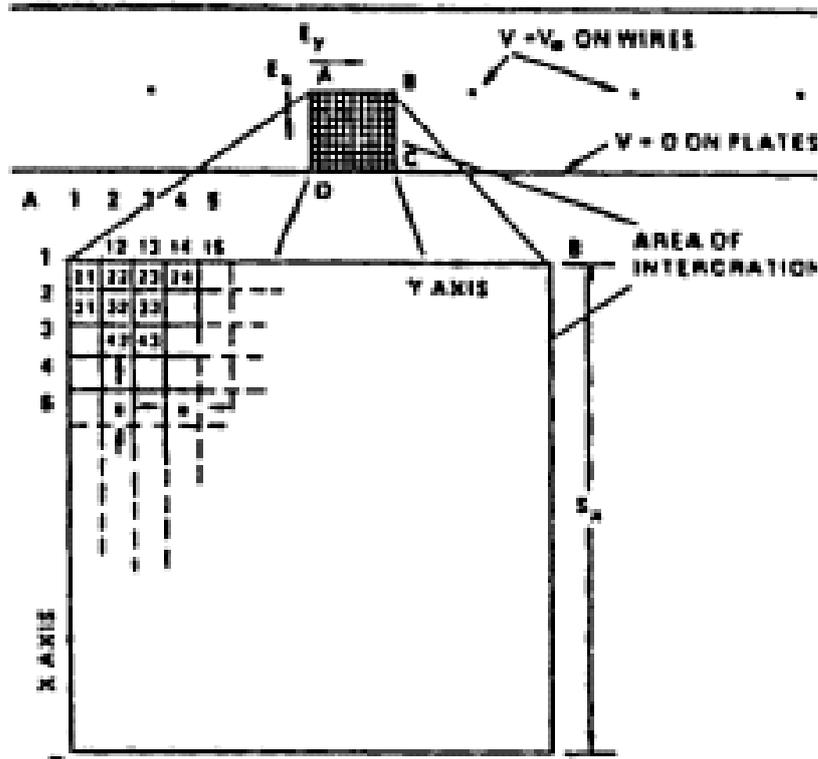
$$\nabla(\epsilon \cdot \nabla V) = -\rho \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\nabla(\rho b \nabla V) =$$

أن حل المعادلات أعلاه يتطلب استخدام الشروط الحدوديه التاليه :-

- قيمه الجهد على سلك التفريغ تساوي الفولتية المطبقه
- الجهد على لوح الترسيب يساوي صفر
- مركبه المجال الكهربائي E y باتجاه (x) تساوي صفر
- مركبه المجال E x باتجاه (y) تساوي صفر وكما في الشكل (2).



أن انحدار الجهد بين سلك التفريغ ولوح الترسيب (E_{on}) يمكن حسابه من المعادله التاليه [15]

$$E_{on} = A\delta + B(\delta/a)^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

حيث a : نصف قطر سلك التفريغ ، δ : كثافه الهواء في الظروف القياسيه ، B, A : ثوابت تعتمد قيمها على الظروف التي تعمل فيها المرسيه من ضغط ودرجه حراره.
 أن قيم المدخلات في البرنامج الحاسوبي تتضمن فولتية السلك () ونصف قطر السلك (a) أما القيمه التخمينيه لكثافه التيار (J_p) تحسب من العلاقه التاليه [6]

$$\frac{3s_p}{B\epsilon_0} \left(v_0 - v_0^s + \frac{\pi a E_{on}}{2s_x} \right) = \left[\left(\frac{\pi a}{2s_x} \right)^2 + \frac{2s_y J_p}{B\epsilon_0} \right]^{3/2} - \left(\frac{\pi a E_{on}}{2s_x} \right)^3 \dots\dots\dots (8)$$

حيث v_0^s : الفولتية التي يبدأ عندها التفريغ الكهربائي.
 البعد بين السلكين متجاورين ($2s_y$) و البعد بين سلك التفريغ ولوح الترسيب (s_x)

$$v_0^s = a \ln(d/a) \dots\dots\dots (9)$$

d : ثابت يعتمد على الشكل الهندسي للمرسيه.
 أما كثافه التيار على لوح الترسيب فتحسب من العلاقه (4).

أن معيار التقارب (Convergence centurion) بين الفولتية التخمينية لكثافة التيار معادله (9) والقيمة الحسابية معادله (4) يعتمد على العلاقة التاليه :-

$$\frac{|J_p - J|}{J_p} < C_J \quad \dots\dots\dots (10)$$

CJ نسبة الخطأ بين قيمتي J, JP وقيمته تساوي 0.1% (أي أن الفرق بين القيمه التجريبيه والقيمه التي تم حسابها في البحث تساوى 0.1%)

من المعادلتين (5) و(6) نحصل على كثافه الشحنة بين نقطتين لأي خط من خطوط القوه الكهربائيه في المرسب

$$\nabla E = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\epsilon_0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\rho_2 = \left(\frac{1}{\rho_1 - \epsilon_0 \nabla E} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\rho_2 = \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\epsilon_0 \nabla E} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\rho_2 = \left[\frac{1}{P_1} + \frac{1}{\epsilon_0} \int_1^2 \frac{ds}{E} \right]^{-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

لإيجاد كفاءه المرسب بالاعتماد على معادله استمراريه الكتله من خلال المعادلات التاليه [8]

$$\text{mass removed} = u_{gv} HS_x C_y - u_{gv} HS_x C_{y+\Delta y} \quad \dots\dots\dots (15)$$

حيث (mass removed) كتله الغاز المنسابه بين نقطتين في المرسبه باتجاه الجريان ، U_{gv} تمثل سرعه الغاز (m/sec) H: تمثل ارتفاع لوح الترسيب (m) ، (S_x) تمثل المسافه بين لوحى الترسيب وسلك التفريغ (m) ، (C): تركيز الجسيمات (g/m^3) ، w: تمثل سرعه الانجراف بالاتجاه (X)

بقسمه المعادله (13) على (Δy) وبأخذ الغايه $(\Delta y \rightarrow 0)$ نحصل على :

$$-U_{gv} HS_x \left(\frac{dl}{dy} \right) = W.C H \quad \dots\dots\dots (16)$$

وبتكامل المعادله (14) من (0) إلى (L) ، حيث (L) يمثل طول لوح الترسيب ، نحصل على :

$$Ln\left(\frac{c_L}{c_0}\right) = \frac{-W.H.L}{U_{gv} H.S_x} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\left(\frac{c_L}{c_0}\right) = e^{\left(\frac{-W.H.L}{U_{gv} H.S_x}\right)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\zeta = \frac{C_0 - C_L}{C_0} \quad \dots\dots\dots (19)$$

C_0

يمثل التركيز الداخل و C_L التركيز الخارج

(ع) كفاءة المرسب ، وبذلك المعادله (19) تصبح :

$$\zeta = 1 - e^{\left(\frac{-W.L}{U_{gv} S_x}\right)} \dots\dots\dots(20)$$

النتائج والمناقشه :-

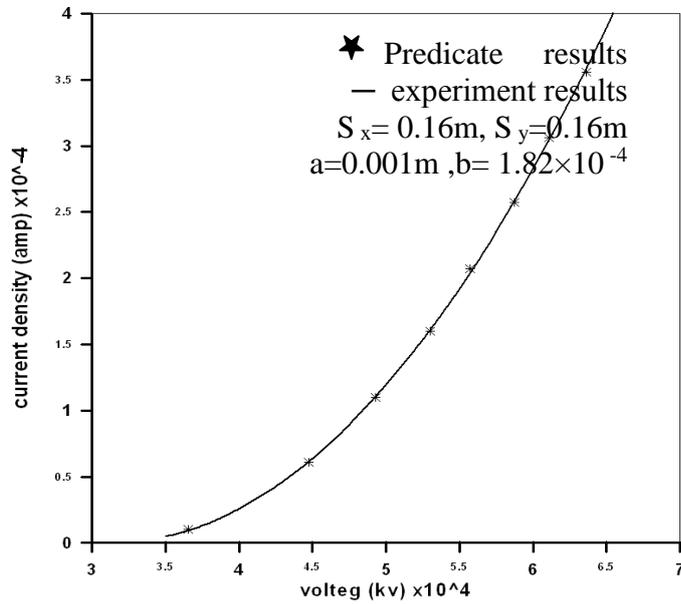
بالإضافة إلى القراءات التي يتم تسجيلها من الميسطرات control metering في المرسب الكهروستاتيكي لإعطاء قيم الفولتية والتيار التي تعمل بموجبها المرسبه هناك فحوصات أكثر دقه يمكن إجراؤها باستخدام البرامج الرياضيه عندما تكون المرسبه خاليه من الغبار (dust free) وفي حاله كونها محمله بالغبار (dust load) نتائج هذه الفحوصات تعتمد على منحنيات الفولتية – التيار التي تعتبر الوسيله الأكثر فاعليه في تحديد كفاءة المرسبه.

في هذا البحث تم إيجاد منحنى الفولتية – التيار للمرسب الكهروستاتيكي عندما تكون خاليه من الغبار لقيم مختلفه من العوامل الهندسيه الداخله في تصميم المرسبه (المسافه بين سلكيين متجاورين من أسلاك التفريغ ، المسافه بين سلك التفريغ ولوح التجميع ، نصف قطر سلك التفريغ ، حركيه حاملات الشحنة) اعتماد على أسلوب المحاكاه الحاسبيه بطريقه (finite difference method) في حل المعادلات (4,2,1)

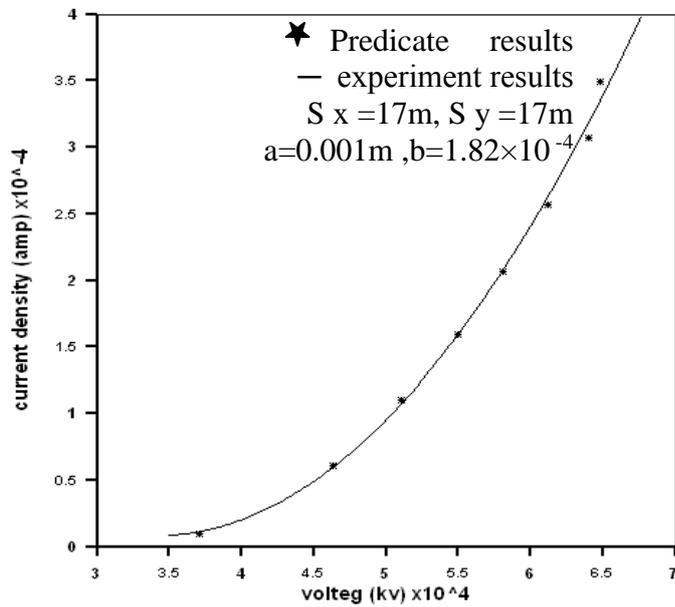
توضح الأشكال (3,4,5,6) منحنيات الفولتية – التيار للمرسب الكهروستاتيكي وحسب العوامل الداخله في تصميم المرسب، يعطي الشكل (3) أفضل توافق بين النتائج التي تم الحصول عليها ومنحنى النتائج العمليه بينما نجد في الأشكال الأخرى (4,5,6) تأثير زياده المسافه الفاصله بين سلكيين متجاورين (Sy) والمسافه بين سلك التفريغ ولوح التجميع (Sx) واضح في عدم تطابق النتائج النظرية مع العمليه لأن منحنى الفولتية-التيار يمثل مقياس لكفاءة المرسبه والكفاءه المثلى هي (99.99%) والأشكال (4,5,6) لا تعطي كفاءه مثلى، لكن جميع المنحنيات تشترك في ناحيه واحده وهي العلاقه الطرديه بين التيار و الفولتية وفي الحالات التي يتم فيها تغير العوامل الداخله في التصميم (المشار إليها في الفقره اعلاه) إن الزيادة بين الفولتية والتيار تكون غير متوافقه بحيث يحصل انحراف بعض النقاط عن المنحنى القياسي [1] .

يعزى هذا الانحراف في قسم من نقاط المنحنى بالإضافة إلى الأسباب اعلاه إلى عدم تحديد قيمه حركيه حاملات الشحنة بدقه حيث تأخذ هذه القيم من النتائج التجريبيه والتي بدورها تؤثر على قيمه كثافه التيار من خلال المعادله (4) أيضا القيمه التخمينيه لكثافه التيار عند مقارنتها مع القيم التي يتم حسابها , يمكن تحديد قيمه الفولته التي يبدأ عندها التفريغ الهالي (corona discharge) من منحنيات الفولتية والتيار. ومن خلال مناقشه النتائج التي حصلنا عليها نجد إن أفضل قيم للعوامل الداخله في تصميم المرسب بأسلوب المحاكاه الحاسبيه للحصول على مرسب ذو كفاءه عاليه هي المثبتة في الشكل (3).

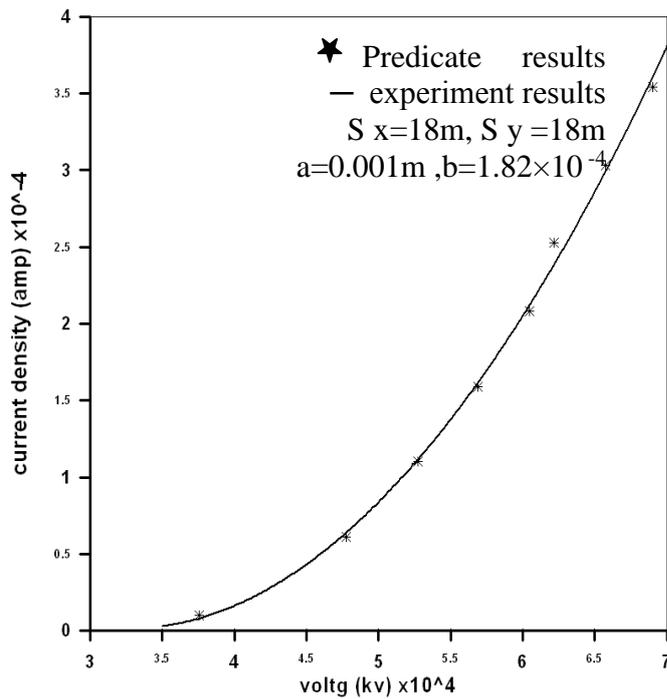
تبين الأشكال(7,8,9) تأثيرا لعوامل (المسافه بين سلك التفريغ ولوح التجميع، تركيز الجسيمات وسرعه الغاز على كفاءه المرسب) عند ثبوت الفولتية ، نلاحظ من الشكل (7) عند زياده المسافه الفاصله تقل الكفاءه كما يتضح عند القيمه (S_x=0.30m) حيث تصبح (97%) بينما عند القيم (S_x=0.16) و (S_x=0.10m) يكون التغير في الكفاءه قليل عند قيم الفولتية الواطئه (20-5)KV أما قيم الفولتية العاليه (20 - 57) KV تكون الكفاءه متساويه تقريبا ، وفي حاله نقصان المسافه بين السلك واللوح اقل من (S_x=10m) تصيح المرسبه غير قادره على إمرار كميته اكبر من الغاز، أن سبب نقصان الكفاءه عندما تزداد المسافه (S_x) يعزى إلى نقصان قيمه المجال الكهربائي الذي بدوره يؤثر على مقدار سرعه الانجراف (migration velocity) نحو لوح الترسيب ، يعطى الشكل (8) كفيته تغير كفاءه الترسيب بزياده تركيز الجسيمات كما موضح عند القيم (2300 kg/m³ ، 3200 kg/m³) وبالتالي نجد الانحطاط واضح في الكفاءه على اعتبار إن التركيز الداخل يحدد كميته التركيز الخارج اعتمادا على المعادله (19) . أما الشكل (9) يبين الدور الذي تلعبه سرعه الغاز على كفاءه الترسيب ، إذا كانت سرعه الغاز عاليه ففي هذه الحاله تقوم القوى الايكتروديناميكيه بالتغلب على القوى الايكتروستاتيكيه المتولده بين سلك التفريغ ولوح التجميع وهذا يؤدي إلى قله الكفاءه ، كما يوضح الشكل أيضا ان الحد المسموح لسرعه الغاز داخل المرسبه (1-1.5m/s) وهذا يتفق مع [1] .



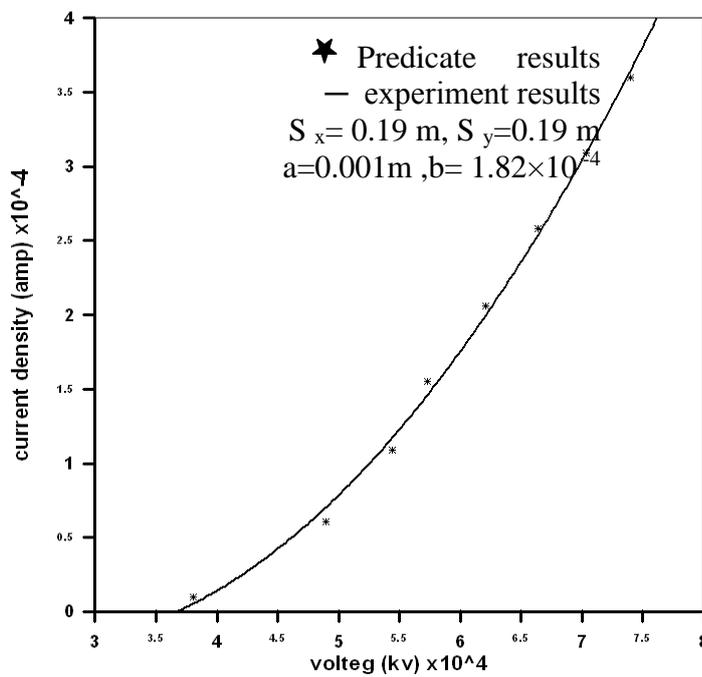
الشكل (3) منحنى الفولتيه - التيار للمرشب الكهروستيكي



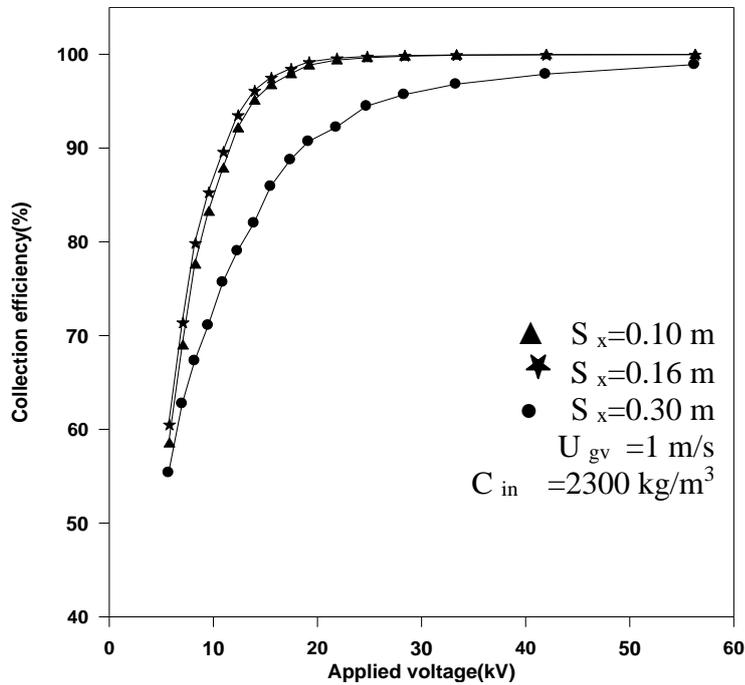
الشكل (4) منحنى الفولتيه - التيار للمرشب الكهروستيكي



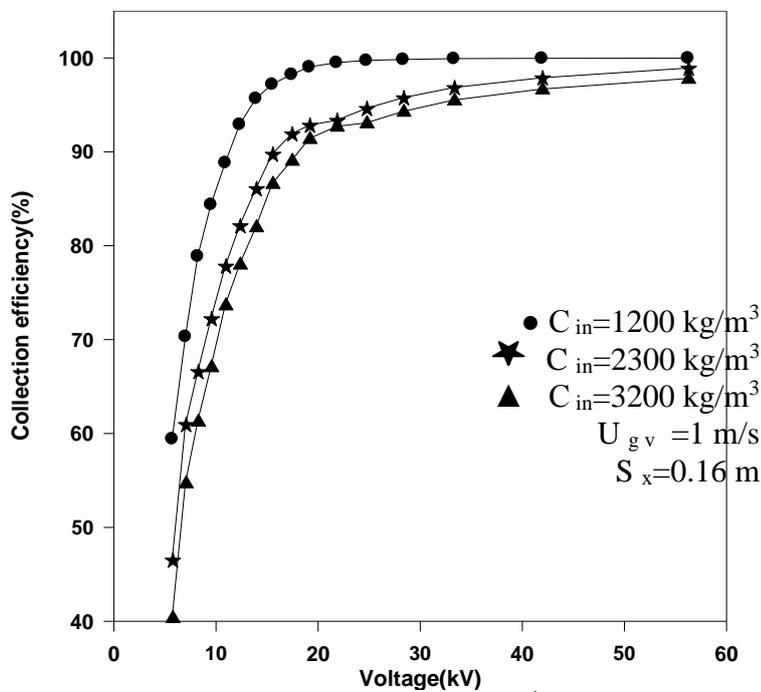
الشكل (5) منحنى الفولتية - التيار للمررب الكهروستكي



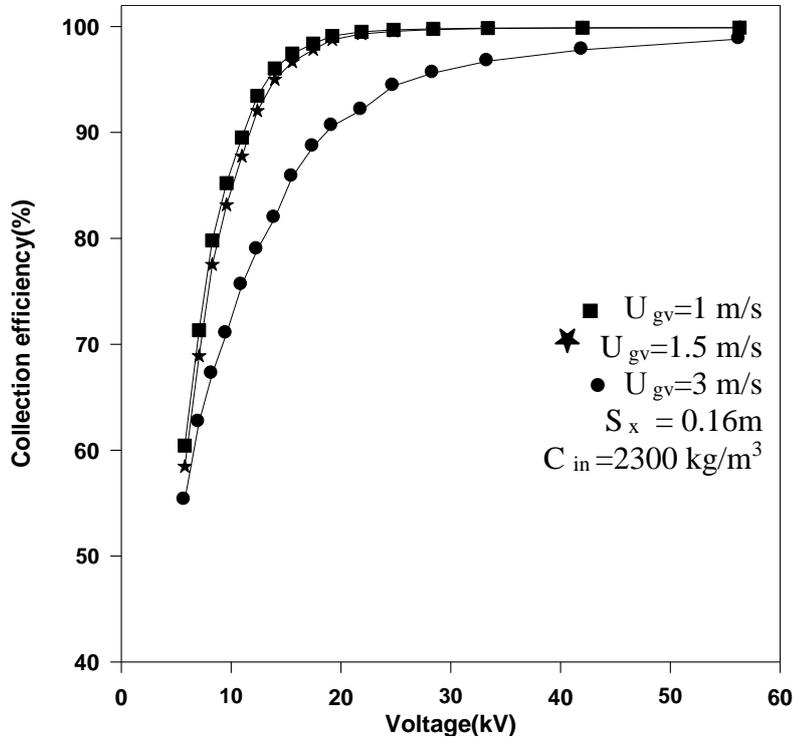
الشكل (6) منحنى الفولتية - التيار للمررب الكهروستكي



الشكل (7) تأثير المسافة بين لوح الترسيب وسلك التفريغ



الشكل (8) تأثير تركيز الجسيمات على كفاءه المرسيب



الشكل (9) تأثير سرعة الغاز الداخل على كفاءه المرسب

Reference:

- [1] J. H. Turner, P.A. Lawless and et al,(1999),Electrostatic Precipitators , EPA , 452 ,B – 02-001.
- [2] K . Adamiak,(1993) , Simulation of corona in wire-duct electrostatic precipitator by means of the boundary element method ,IEEE Trans. Ind. App. 30(2),PP.381-386.
- [3] B.S. Rajanikanth,(1993) , Studies on the Voltage –Current Characteristics of Duct-Type Electrostatic Precipitator under dc/pulse Energizations , Thesis Indian Institute of Science ,India.
- [4] B.S. Rajanikanth and D.V.S. Sarma,(2002), “ A quasi- analytical approach based on R-Function for Modeling the Pre-breakdown V-I Characteristics of an electrostatic precipitator ” IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation; Vol.9,PP.130-139 .
- [5] B.S. Rajanikanth, N. Thirumarah,(2002) ,Predication of Pre-breakdown V-I characteristics of an Electrostatic Precipitator Using A combined Boundary Element –Finite Difference Approach ,Fuel Processing Technology 76,PP.159-186.
- [6] J. Anaagnostopoulos , G. Bergels,(2002), Corona discharge simulation in wire-duct electrostatic precipitator J. of Electrostatic ,54,129-147.
- [7] G. Cooperman ,(1984),Unified efficiency theory for electrostatic precipitator ,J . Atmos. Environ . 18(2)277-285.

- [8] F.W. Peek, Jr. ,(1929), dielectric phenomena in high voltage engineering ,McGraw –Hill. New York .USA. 1929.
- [9] G. Leonard . M. Michner , S. A. Self ,(1980),Particle transport in electrostatic precipitator J, 14,1289-1299.
- [10] Z. Zhibin ,Z. Guoquan ,(1992),New model of electrostatic precipitation efficiency accounting for turbulent mixing ,J.Aerosolsci.23(2) 115-121.
- [11] K. M. Yoo, J.S .Lee, M.D. Oh,(1997), Charging and Collection of submicron particles in two-stage parallel-plate electrostatic precipitators ,Aerosol Sci. & Tech.27,,308-323.
- [12] S. H. Kim and K. W. Lee,(2000), Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance and Comparison with Existing Theoretical Predication Models. Journal of Electrostatic , 48, pp. 3-25 .
- [13] Hideyuki Ando¹, Yosuke Kuroda¹, Yoshihiro Kawada¹, Takeo Takahashi¹, Yoshiyasu Ehara¹,(2006), Improvement in the Performance by Changing Electrode Shape in Barrier Discharge type ESP, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku ,Tokyo 158-8557 Japan.
- [14] Kenneth Parker and Norman Plaks ,(July 2004), Electrostatic Precipitator (ESP)Training Manual, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington, EPA-600/R-04/072 .
- [15] Anderson ,E. Report , Western Precipitator Co. ,(1924), Transactions of the American Institute of Chemical Engineers, 16-69.

Design and Maintenance the duct type Electrostatic Precipitator

**Azhr Abdul Zahra
Fulyful**

**Adnan Mavmos
Raheem**

**Fadhil khaddam
Mansoor**

Karbalb /university Science college /Physics department

Abstract:-

This research presents a mathematical programs of design and maintenance the electrostatic precipitator by using Finite Difference Method to solve Poisson's and current continuity equation and Trapezoidal Rule to calculate electric field , The programs help in predicting the voltage-current curve of the precipitator which will be important tool to determine the collection efficiency of the precipitator, The program begins with the calculation of potential distribution and space charge in the program domain , the predicted results were validated against the experimental results. In this paper, the collection efficiency also calculated and the effects of the gas velocity, particles density and the space between plate and discharge electrode on collection efficiency are discussed.