

Beräknat strömningsmönster (strömlinjer) för en "tvådimensionell", isotermt ventilerad lokal.

Strömningsberäkningar för bättre komfort och luftkvalitet i ventilerade lokaler

Möjligheterna att beräkna luftrörelser i ventilerade lokaler har under de senaste 20 åren genomgått en snabb utveckling. Så sent som i slutet av 60-talet lyckades man för första gången att numeriskt lösa det ekvationssystem som matematiskt beskriver turbulent, 2-dimensionell strömning med återcirkulation i slutna utrymmen.

Beräkningsmodeller har sedan successivt utvecklats för att klara 3-dimensionell strömning, termiskt styrda luftrörelser och spridning av föroreningar. Här ges en översikt av de beräkningstillämpningar som presenterats inom såväl konventionellt ventilerade lokaler som inom renrumstekniken.



Roy Holmberg

Tekniker, utvecklingschef för Don- & terminalapparater vid Fläkt Evaporator AB i Jönköping

I och med att ökad vikt läggs vid inomhusklimatet, såväl med avseende på luftkvaliteten som den termiska komforten, ökar behovet av att känna till hur luften strömmar i en ventilerad lokal. Krav på bättre luftkvalitet leder direkt till större luftflöden, om inte en effektivare användning av ventilationsluften kan åstadkommas för att avlägsna föroreningar och tillföra ren luft.

Speciellt i renrum med extrema krav på luftens renhet fordras god kunskap om hur spridningen av förore-

ningar sker. Även då ventilationsluften används för tillförsel eller bortförsl av värme är luftströmningen i rummet av stor betydelse. Lyckligtvis har möjligheterna att beräkna luftrörelserna ökat i takt med behovet.

Den matematiska beskrivningen av luftrörelserna är komplex, eftersom strömningsfältet är turbulent och innehåller områden med återcirkulation. Först i slutet av 60-talet lyckades man vid Imperial College i London att utveckla beräkningsmodeller, som kan beskriva turbulent 2-dimensionell strömning med återcirkulation i slutna utrymmen.

Det var pionjärarbeten av prof. Spalding och hans medarbetare, se Gosman et al (1969), samt arbeten vid Los Alamos Scientific Laboratory i Californien som startade en intensiv utveckling när det gäller beräkning av turbulent strömning. I Norden utfördes de första arbetena inom detta område vid CTH i Göteborg (Holmberg 1971).

Tillämpningen av dessa beräkningsmodeller på luftrörelserna i ventilerade lokaler presenterades först av Nielsen (1973, 1974), då verksam vid DTH i Köpenhamn. Som framgår av figur 1 ger beräkningarna av hastighetsfördelningen i ett rum med stationär, 2-dimensionell, isoterm strömning en relativt god överensstämmelse med experiment.

Det fortsatta arbetet vid CTH kom också att inriktas mot luftrörelseberäkningar i rum genom ett samarbete med Fläkt Evaporator AB i Jönköping. De verifierande mätningarna av hastighets- och temperaturfördelningen vid såväl isoterm som icke-isoterm, 2-dimensionell strömning utfördes som examensarbete vid Fläkt av Åkesson (1975) med artikelförfattaren som handledare. Resultaten (figur 2 och 3) redovisas i artiklarna Holmberg et al (1975) samt Larsson, Holmberg (1977).

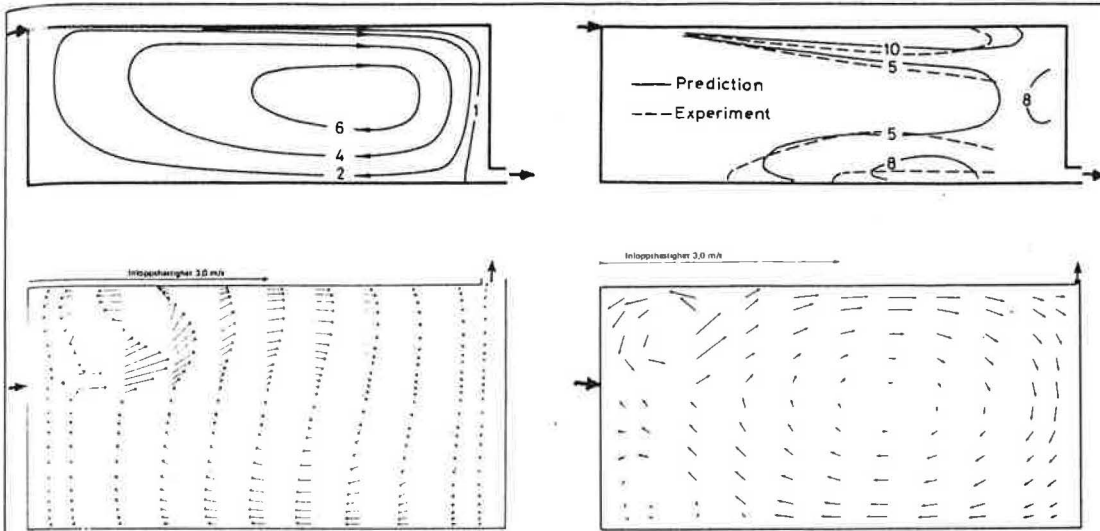


Fig. 1. En "2-dimensionellt", isotermt ventilerad lokal ($L/H = 3,0$) med inloppshastighet 1,8 m/s och luftflöde 3,3 l/s, m^2 golvarea enligt Nielsen (1974).

Redan i början av 70-talet utvecklades vid Imperial College den 2-dimensionella beräkningsmodellen till att omfatta även 3-dimensionell turbulent strömning, enligt Caretto et al (1972). Tidiga beräkningstillämpningar inom ventilationsområdet av dessa 3-dimensionella modeller har utförts vid NTH, Trondheim av Hjertager, Magnussen (1976, 1978).

Strömningsberäkningarna har förenklats successivt i takt med att dataprogrammen har förbättrats. Idag finns generella program tillgängliga för såväl 2- som 3-dimensionella beräkningar.

Beräkningsmodeller

Strömningsfält som är laminära, isoterma och inkluderar områden med återcirkulation kan beskrivas matematiskt korrekt med kontinuitetsekvationen och Navier-Stokes ekvationer (en impulsekvation för vardera koordinatriktningen). Turbulent strömning måste å andra sidan beskrivas approximativt med någon typ av turbulensmodell, som utgörs av en eller flera transportekvationer för turbulenta storheter med empiriskt bestämda konstanter.

Den vanligaste turbulensmodellen, den så kallade $k-\epsilon$ modellen, innehåller ekvationer för den turbulenta kinetiska energin, k , och den turbulenta dissipationen, ϵ , se Harlow, Nakayama (1968) och Launder, Spalding (1972). Turbulensekvationerna kopplas till impulsekvationerna genom att den turbulenta viskositeten adderas till den viskösa.

Icke-isoterm strömning fordrar ytterligare en differentialekvation, nämligen energiekvationen, som ger temperaturfördelningen i fältet. De termiska krafternas inverkan på strömningsfältet beskrivs genom att införa en gravitationsterm i den vertikala impulsekvationen samt i turbulensekvationerna (Launder, 1975).

Spridningen av föroreningar beskrivs med en koncentrationsekvation som är analog med energiekvationen. Med föroreningar som helt följer luft rörelserna (sk passiva föroreningar) kan hastighetsfältet beräknas utan hänsyn till föroreningarnas spridning. Koncentrationsekvationen ger sedan spridningsbilden som bestäms av den konvektiva rörelsen och diffusionen. I de flesta fall dominerar diffusionen av de turbulenta rörelserna.

Den numeriska lösningen av differentialekvationerna beskrivs i separat faktaruta.

Konventionella tillämpningar

Den turbulenta $k-\epsilon$ modellen har tidigt använts för beräkning av 2-dimensionell strömning i ventilerade lokaler under isoterma förhållanden av Nielsen (1973, 1974) och Holmberg et al (1975). Resultaten från studier av strömningen i rum med längd/höjdförhållandet $L/H = 3,0$ och med luftstråle utefter tak (figur 1), respektive rum ($L/H = 2,0$) med fristråle från vägg (figur 2), visar relativt god överensstämmelse mellan beräkningar och experiment.

Luft rörelserna i ventilerade lokaler påverkas emell...

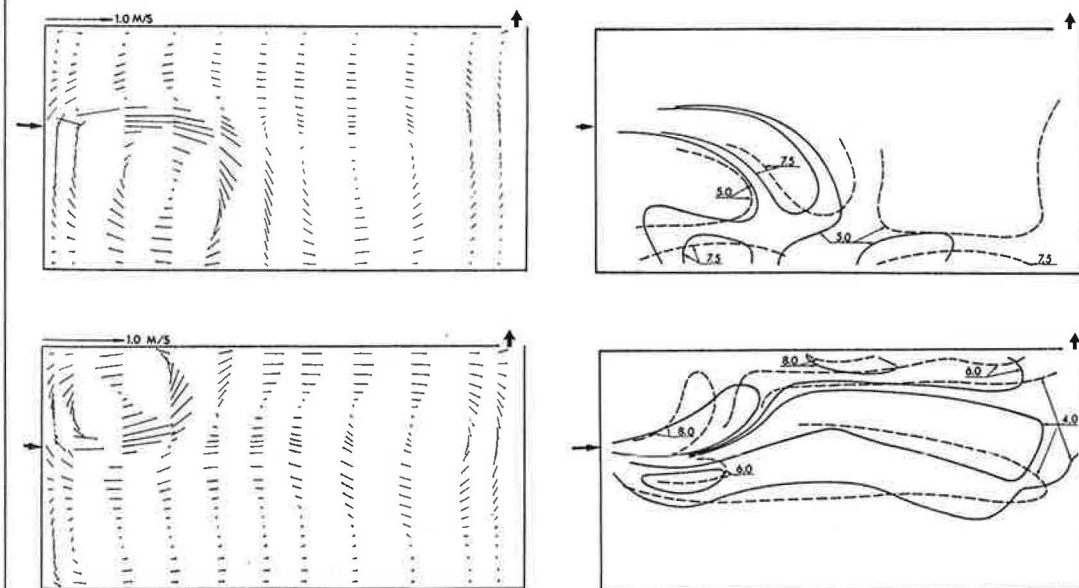


Fig. 2. En "2-dimensionellt", isotermt ventilerad lokal ($L/H = 2,0$) med inloppshastighet 3,0 m/s och luftflöde 4,5 l/s, m^2 golvarea enligt Holmberg et al (1975).

Fig. 3a. En "2-dimensionellt" ventilerad lokal ($L/H = 2,0$) med inloppshastighet 3,6 m/s, luftflöde 4,5 l/s, m^2 golvarea och undertemperatur på tilluften motsvarande $A_t = -4,9 \cdot 10^{-4}$ enligt Larsson, Holmberg (1977).

Fig. 3b. En "2-dimensionellt" ventilerad lokal ($L/H = 2,0$) med inloppshastighet 3,0 m/s, luftflöde 4,5 l/s, m^2 golvarea och övertemperatur på tilluften motsvarande $A_t = 7,5 \cdot 10^{-4}$ enligt Larsson, Holmberg (1977).

De partiella differentialekvationerna kan i samtliga strömningsfall uttryckas i tensorform med följande generella transportekvation:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\sigma \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma U_i \phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) = S_\phi + S_B$$

där ϕ , Γ_ϕ , S_ϕ och S_B definieras för de olika ekvationerna enligt

Ekvation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ	S_B (termisk effekt)
Kontinuitet	1	0	0	0
Impuls	U_1	μ_{eff}	$-\partial p / \partial x_1$	0
Impuls	U_2	μ_{eff}	$-\partial p / \partial x_2$	0
Impuls	U_3	μ_{eff}	$-\partial p / \partial x_3$	$-\rho \beta g_3 (t - t_{ref})$
Entalpi	h	μ_{eff} / σ_h	P_k / V (värmekälla)	0
Koncentration	c	μ_{eff} / σ_c	\dot{m} / V (föroreningskälla)	0
Turbulent energi	k	μ_{eff} / σ_k	$G - \rho \epsilon$	G_B
Turb. dissipation	ϵ	$\mu_{eff} / \sigma_\epsilon$	$(C_{1\epsilon} G - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \epsilon / k$	$C_{1\epsilon} G_B \epsilon / k$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \rho k^2 / \epsilon; \quad G = \mu_{eff} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right); \quad G_B = -\beta g_3 \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial t}{\partial x_3}$$

Konstanter: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_h = 0.7$, $\sigma_c = 0.7$

Den första termen beskriver de instationära tidsberoende variationerna i fältet, den andra termen de konvektiva rörelserna och den tredje termen summan av den viskösa och turbulenta diffusionen. Källtermen S_ϕ i impulsekvationerna utgörs av tryckgradienten. I turbulensekvationerna uttrycker källtermen nettoproduktionen av den turbulenta energin respektive dissipationen, medan källtermen i energi- och koncentrationsekvationerna anger värme- resp föroreningskällornas styrka.

Källtermen S_B beskriver de termiska krafternas inverkan på hastighetsfält och turbulensstorheter. Ytterligare källtermer i turbulensekvationerna har testats för att ta hänsyn till ej fullt turbulent strömning, se Jones, Launder (1972) och Patel et al (1985). De värden på konstanterna som ges i tabell 1 har blivit något av standard i litteraturen (Launder, Spalding 1974), även om andra värden förekommer.

Randvärden ges på alla begränsningsytor. Väggarnas inverkan

på hastighets- och turbulensstorheter beskrivs med väggfunktioner, se Launder, Spalding (1972) och Rodi (1980). Speciell omsorg måste ägnas tilluftsöppningarna i ventilerade lokaler, eftersom dessa ofta är små i förhållande till lokalens storlek och avgörande för strömningsbilden (Nielsen 1979).

Ekvationerna löses numeriskt med någon finit differensmetod. Tidigt utbildades två skolor. Den ena metoden utvecklades vid Imperial College, London, och är baserad på SIMPLE-algoritmen enligt Caretto et al (1972) med sk uppströms differenser. Här finns dataprogrammen PHOENICS (Spalding 1981) och TEACH-T (Gosman, Ideriah 1976) tillgängliga. Den andra, benämnd MAC-metoden, har utvecklats vid Los Alamos Scientific Laboratory i samband med beräkning av instationära, tidsberoende strömningsproblem (Harlow, Welch 1965). Under senare år har en intressant programvara FLOW3D med alternativa lösningsalgoritmer utvecklats vid Harwell Laboratory i England.

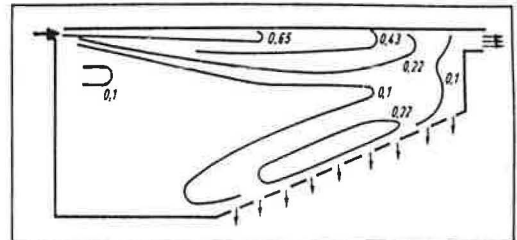
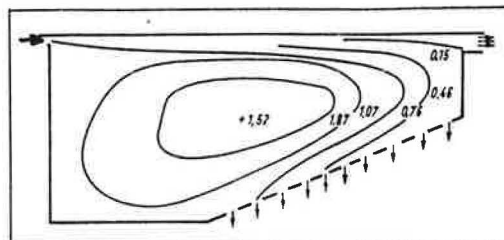
lertid oftast av termiska krafter genom under- eller övertempererad tilluft, icke-adiabatiska väggar och värmekällor i lokalen. Tidiga beräkningar av icke-isoterm strömning, där hänsyn tagits till de termiska krafternas inverkan på medelhastigheten genom gravitationsterm enbart i impulsekvationen, har publicerats av Nielsen (1974) för 2-dimensionell strömning i rum ($L/H = 3,0$) med över- och undertempererad tilluft genom luftstråle utefter tak. Under samma förutsättningar har Hjertager, Magnussen (1976, 1978) beräknat 3-dimensionell strömning i rum ($L/H = 2,3$; $B/H = 1,2$), där B anger rummets bredd.

Icke-isoterma beräkningar, där även hänsyn tagits till de termiska krafternas inverkan på turbulensen genom gravitationstermer i k- ϵ modellen, har presenterats av Larsson (1977) och Larsson, Holmberg (1977) för 2-dimensionell strömning i rum ($L/H = 2,0$) med

under- och övertempererad tilluft genom fristråle från vägg. Figur 3 visar att överensstämmelsen med experiment är relativt god. En liknande turbulensmodell har använts av Nielsen et al (1979) och Hanel, Scholz (1979) för 2-dimensionell strömning i rum ($L/H = 2,8$) med undertempererad tilluft genom luftstråle utefter tak.

Under senare år har många tillämpningar av så väl isoterm som icke-isoterm strömning presenterats. Exempel på 2-dimensionell strömning ges av Ehle, Scholz (1984) för hörsalar ($L/H = 3,4$) med isoterm tilluft genom luftstrålar utefter tak och sluttande golv, se figur 4, av Rheinländer (1981) för rum ($L/H = 2,0$) med undertempererad tilluft genom fristråle mitt på vägg, samt av Schmitz, Renz (1985) för små badhallar ($L/H = 1,5$) med övertempererad fönsterbänksinblåsning. Exempel på 3-dimensionell strömning ges av Ya-

Fig. 4. En "2-dimensionell", isoterm ventilerad hörsal ($L/H = 3,4$) enligt Ehle, Scholz (1984).



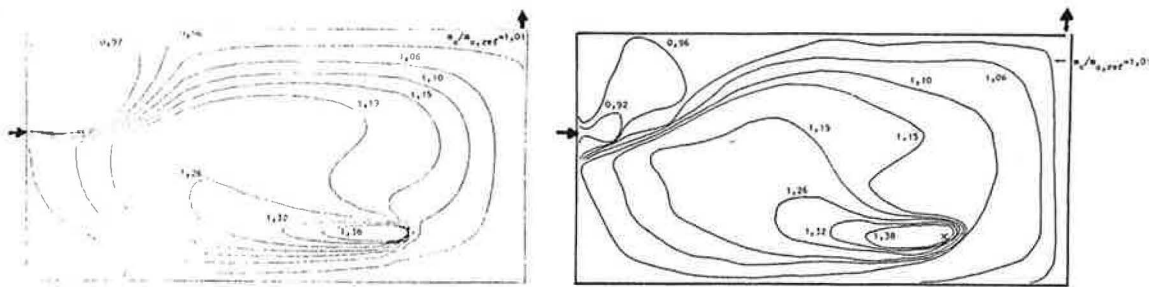


Fig. 5. En "2-dimensionell", isotermt ventilerad lokal ($L/H = 2,0$) med inloppshastighet 3,0 m/s, luftflöde 4,5 l/s, m^2 golvarea och intern föroreningskälla enligt Davidson (1983).

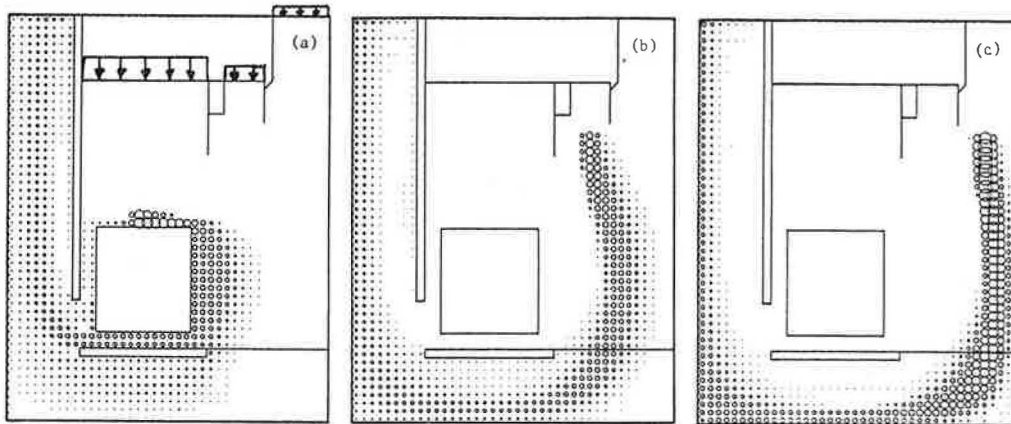


Fig. 6. Beräknad hastighetsfördelning och beräknade förorenings-spridningar i en "3-dimensionell", isotermt ventilerad renrumstunnel med parallellt tilluftsflöde och intern föroreningskälla enligt Jinno (1986).

mazaki et al (1987) för rum ($L/H = 1,5$; $B/H = 1,5$) med övertempererad fristråle från golvplacerad fläktkonvektor och av Qizingyan, van der Kooi (1987) för rum ($L/H = 1,87$; $B/H = 1,07$) med undertempererad såväl bakkantsinblåsning som fönsterbänksinblåsning.

Spridningen av en passiv gasförorening från en stationär linjekälla i det isoterma, 2-dimensionella hastighetsfältet som visas i figur 2 har beräknats av Davidsson (1983). Resultaten jämförs i figur 5 med motsvarande mätningar av koncentrationsfördelningen utförda som examensarbete vid Fläkt av Christiansson, Masimov (1977) med artikelförfattaren som handledare.

En speciell tillämpning av strömningsberäkningar har presenterats av Davidsson, Olsson (1987), för bestämning av ventilationsluftens åldersfördelning i ett rum. Hastighetsfältet för 3-dimensionell, icke-isoterm strömning ligger här till grund för beräkning av tillufts-koncentrationen i rummet.

Renrumstillämpningar

Renrumstekniken har under senare år blivit ett nytt tillämpningsområde för strömningsberäkningar. Eftersom en mycket effektiv avskiljning av partiklar i tilluften är möjlig med filter, är det istället spridningen av i rummet alstrade partiklar som kan utgöra problem vid produktionen.

Vid beräkning av partiklarnas spridning antages vanligtvis att partiklarna är passiva och följer luftens medelrörelse i rummet. Detta gäller partiklar mindre än storleksordningen $0,5 \mu m$. Hastighetsfältet kan då lösas utan hänsyn till föroreningarna. Den stora luftomsättningen medför små temperaturdifferenser och strömningsfältet kan antas isotermt utan inverkan av termiska krafter, vilket kraftigt förenklar beräkningsmodellen.

Strömningen i rena rum är turbulent, men intensiteten är låg i utrymmen med sk "laminar flow", där in-strömningen sker med låg hastighet över hela begräns-

ningsytan. Föroreningskoncentrationen bestäms förutom av den konvektiva transporten också av diffusionen, vars storlek ges av diffusionskonstanten σ_i i koncentrationsekvationen.

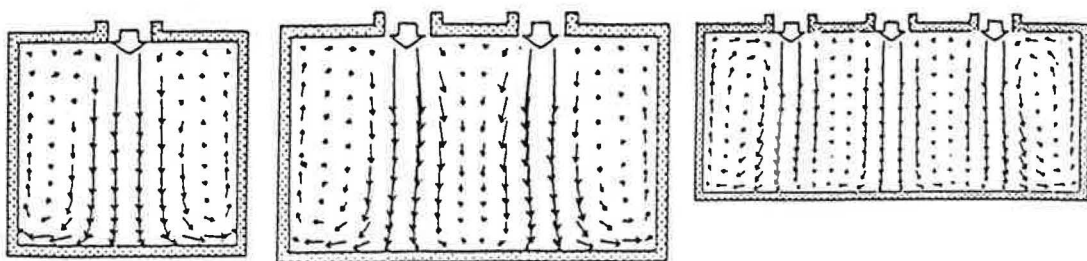
Strömningsfältet i en renrumstunnel har behandlats av ett flertal japanska författare. Tillförseln av luft över arbetsborden sker här med parallellströmning genom HEPA-filter, medan tillförseln till arbetsgången ofta sker med konventionella takspridare. Unno (1984) har beräknat detta fall av isoterm, 3-dimensionell strömning med MAC-metoden utgående från rörelseekvationerna tillsammans med den turbulenta $k-\epsilon$ modellen.

Denna modell har tillsammans med koncentrationsekvationen använts av Hayashi et al (1986) för att beräkna den 2-dimensionella spridningen av en förorening från en linjekälla i arbetsgången med olika luftföringsmetoder. Resultaten visar att konventionella takspridare ger återcirkulationsströmning i gången och viss inblandning av föroreningar i den rena tunnelarean, medan parallellströmning via HEPA-filter ger en effektiv borttransport av föroreningar.

Parallellströmningsfallet har även använts av Jinno (1986) för beräkning av den 2-dimensionella förorenings-spridningen i en renrumstunnel, men utgående från ett laminärt strömningsfält och således utan att använda någon turbulensmodell (figur 6). Denna förenklade simulering av strömningsfältet kan ge avvikelser, speciellt i områden med återcirkulation. Shanmugavelu et al (1987) har utfört liknande beräkningar i ett parallellflödesrum med en bänk som störning. Strömningsfältet har bestämts med enklast tänkbara turbulensmodell, dvs. med antagande om konstant turbulent viskositet i hela fältet.

Det 3-dimensionella strömningsfältet i konventionella sk turbulenta flödesrum har beräknats av Kato et al (1986) med MAC-metoden och $k-\epsilon$ modellen. Tre modellrum med 9, 24 och $40 m^2$ golvarea har analyserats med 1, 4 och 9 takspridare och specifika flödena 53, 83 resp 99 rumsvol/h, se figur 7.

Fig. 7. Beräknad hastighetsfördelning i "3-dimensionellt", isotermt ventilerade turbulenta flödesrum med vardera 1, 4 och 9 takspredare samt luftomsättning 53, 83 resp. 99 rumsvol/h enligt Kato et al (1986). Bilderna visar ett vertikalt snitt genom takspredarna.



Slutsatser

Tillämpningsexemplen visar att de presenterade beräkningsmodellerna är mycket användbara för beräkning av hastighets- och temperaturfälten i ventilerade lokaler. Noggrannheten i beräkningarna är relativt god speciellt vid enkla geometrier och isoterma förhållanden, medan termiskt styrda luft rörelser är svårare att beskriva korrekt. På samma sätt kan spridningen av föroreningar beräknas jämförelsevis noggrant i de fall föroreningarna är passiva och följer luft-rörelserna. Ett speciellt svårt och för noggrannheten känsligt problem är att beskriva tillförseln av luft till lokalen. En vidareutveckling av beräkningstekniken inom ventilationsområdet fordrar därför ytterligare

studier av bland annat randvillkor, värmekällor och källor av icke-passiva föroreningar.

Aktiviteterna inom detta område har ökat kraftigt de senaste åren tack vare att bättre beräkningsprogram blivit tillgängliga. Forskning pågår vid högskolorna i alla de nordiska länderna. Ett flertal europeiska samarbetsprojekt har startats. Fläkt har ansett tiden varumogen att ekonomiskt stödja ett projekt vid Installationsteknik, KTH. Förväntningarna är stora på att beräkningsprogrammen kommer att bli värdefulla hjälpmedel vid projektering av ventilationsanläggningar. Dock bör noteras att användningen av de komplicerade beräkningsprogrammen fordrar specialistkompetens inom strömningsteknik.

Referenser

- Caretto, L.S., Gosman, A.D., Patankar, S.V., Spalding, D.B. (1972), Two calculation procedures for steady three-dimensional flows with recirculation. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Paris.
- Christiansson, L., Masimov, T. (1977), Experimentell bestämning av koncentrationsfördelningen i en ventilerad lokal med en intern föroreningskälla. Examensarbete (CTH) utfört vid Fläkt Evaporator AB, Jönköping.
- Davidsson, L. (1983), Beräkning av hastighets- och koncentrationsfördelning i en ventilerad lokal med en föroreningskälla med PHOENICS-koden, Examensarbete vid Inst. f. Till. Termodyn. o Strömn.lära, CTH.
- Davidsson, L., Olsson, E. (1987), Calculation of age and local purging flow rate in rooms, Building Environment, vol 22, No 2, pp. 111-127.
- Ehle, A., Scholz, R. (1984), Beispiele für die numerische Berechnung von zweidimensionalen Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern in Räumen, Luft- und Kältetechnik, No 4, pp. 192-194.
- Gosman, A.D., Pun, W.M., Runchal, A.K., Spalding, D.B., Wolfshtein, M.W. (1969), Heat and mass transfer in recirculating flows, Academic Press, London.
- Gosman, A.D., Ideriah, F.J.K. (1976), TEACH-T: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows, Dept. of Mech. Engng, Imperial College, London.
- Hanel, B., Scholz, R. (1979), Beitrag zur Modellierung zweidimensionaler isothermer und nichtisothermer turbulenter Strömungen in Räumen, Luft- und Kältetechnik, No 3, pp. 154-157 (Part 1) and No 4, pp. 209-213 (part 2).
- Harlow, F.H., Nakayama, P.I. (1968), Transport of turbulence energy decay rate, Rep. LA 3854, Los Alamos Sci. Lab., Univ. California.
- Harlow, F.H., Welch, J.E. (1965), Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, Phys. Fluids, vol.8, p. 2182.
- Hayashi, T., Okonogi, T., Takemura, M. (1986), Proposal of air supply method for clean tunnel system, Proc. of 8th Int. Symp. on Contam. Contr., ICCCS, Milan, pp. 332-339.
- Hjertager, B.H., Magnussen, B.F. (1976), Numerical prediction of three-dimensional turbulent buoyant flow in a ventilated room, Int. Seminar on Heat and Mass Transfer, Dubrovnik.
- Hjertager, B.H., Magnussen, B.F. (1978), Numerisk beräkning av tredimensionell strömning i et ventilerat rom, Norsk VVS, Nr 1.
- Holmberg, R. (1971), A phenomenological model of turbulence in steady two-dimensional separated flows, Licentiatavhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Holmberg, R., Larsson, M., Sundkvist, S-G (1975), Beräkning av hastighetsfördelningen i en ventilerad lokal, VVS, Nr 10.
- Jinno, N. (1986), Study of air flow pattern in the clean room for manufacturing semi-conductors, Proc. of 32nd Annual Techn. Meeting on Envir. Technology, Inst. Envir. Sci., Dallas, pp. 556-564.
- Jones, W.P., Launder, B.E. (1972), The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, pp. 301-314.
- Kato, S., Murakami, S., Chirifu, S. (1986), Study on air flow in conventional flow type clean room by means of numerical simulation and model test, Proc. of 8th Int. Symp. on Contam. Contr., ICCCS, Milan, pp. 781-791.
- Launder, B.E. (1975), On the effect of a gravitational field on the turbulent transfer of heat and momentum, J. Fluid Mech., Vol 67, pp. 569-581.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. (1972), Mathematical models of turbulence, Academic Press, London.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. (1974), The numerical computation of turbulent flow, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engng, vol 3, pp. 269-289.
- Larsson, M. (1977), Predictions of buoyancy influenced flow in ventilated industrial halls, Int. Seminar on Heat Transfer in Buildings, Dubrovnik.
- Larsson, M., Holmberg R. (1977), Beräkning av termiskt påverkade luft rörelser i en ventilerad lokal, VVS, Nr 11.
- Nielsen, P.V. (1973), Beregning af luftbevegelse i et ventileret lokale, Ingeniørens Ugeblad, Nr 5.
- Nielsen, P.V. (1974), Strømningsforhold i luftkonditionerede lokaler, Doktorsavhandling, Danmarks Tekniske Högskola, Köpenhamn.
- Nielsen, P.V. (1979), The distribution of air velocity in large rooms with small side-wall mounted supply openings, XV Int. Congr. of Refr., Com. E1/8, Venezia.
- Nielsen, P.V., Restivo, A., Whitelaw (1979), Buoyancy-affected flows in ventilated rooms, Num. Heat Transfer, vol 2, pp. 115-127.
- Patankar, S. V. (1980), Numerical Heat
- Patel, V.C., Rodi, W., Scheurer, G. (1985), Turbulence models for near-wall and low-Reynolds number flows — A review, AIAA Journal, vol. 23, pp. 1308-1319.
- Qingyan, C., van der Kooij, J. (1987), Experiments and 2D approximated computations of 3D air movement, heat and concentration transfer in a room, ROOMVENT -87, Stockholm, Int. Conf. on Air Distr. in Vent. Spaces, vol 4.
- Rheinländer, J. (1981), Numerische Berechnung von vorwiegend durch die Schwerkraft angetriebenen Raumströmung, HLH 32, No 6, pp. 234-235.
- Rodi, W. (1980), Turbulence Models and their Applications in Hydraulics, Int. Assoc. of Hydr. Research, Delft.
- Schmitz, R.M., Renz, U. (1985), Berechnung turbulenter Raumluftströmungen bei gekoppeltem Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch, CLIMA 2000, Kopenhagen, Int. Conf. on Indoor Climate, vol 4, pp. 371-376.
- Shanmugavelu, I., Kuehn, T.H., Liu, B.Y.H. (1987), Numerical simulation of flow fields in clean rooms, Proc. of 33rd Annual Techn. Meeting on Envir. Technology, Inst. Envir. Sci., San Jose, California, pp. 298-303.
- Spalding, D.B. (1981), A general purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow. Mathematics and computers in simulation, IAMCS XXIII, pp. 267-276.
- Unno, K. (1984), On super clean space for manufacturing process of semiconductors, Prof. of 7th Int. Symp. on Contam. Contr., ICCCS, Paris.
- Yamazaki, K., Komatsu, M., Otsubo, M. (1987), Application of numerical simulation for residential room air conditioning, ASHRAE Trans., vol. 93, part 1, pp. 210-225.
- Åkesson, K. (1975), Experimentell bestämning av hastighets- och temperaturfördelningen i en ventilerad lokal, Examensarbete (CTH) utfört vid Fläkt Evaporator AB, Jönköping.